



**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

**DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA  
GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y  
AUTOMÁTICA**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**SISTEMA DE COMUNICACIONES DE ALTAS PRESTACIONES  
POR LUZ VISIBLE BASADO EN LEDS: IMPLEMENTACIÓN  
HARDWARE**

AUTOR: David Hernando Boyo

TUTOR: José Manuel Sánchez Pena

DIRECTOR: Agustín Fernández Pacheco Román

JUNIO, 2015



Página dejada en blanco intencionadamente



**Título:** Sistema de comunicaciones de altas prestaciones, por luz visible, basado en LEDs: implementación hardware

**Autor:** David Hernando Boyo

**Tutor:** José Manuel Sánchez Pena

## EL TRIBUNAL

**Presidente:** \_\_\_\_\_

**Vocal:** \_\_\_\_\_

**Secretario:** \_\_\_\_\_

Realizado el acto de defensa y lectura del Trabajo fin de Grado el día \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ 2015 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de \_\_\_\_\_

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE



Página dejada en blanco intencionadamente

## Agradecimientos

A mi tutor José Manuel Sánchez Pena, por darme la oportunidad de embarcarme en este trabajo y conocer un poco más el mundo de la electrónica.

A mi director de proyecto Agustín por los consejos, las risas y los cafés en el despacho y en la cafetería de la Universidad.

A mi compañero de proyecto Cristian, por las horas agotadoras que hemos pasado juntos en el grado y en especial en el proyecto.

A mi familia, en especial a mis padres y hermanos, por darme la oportunidad de estudiar una ingeniería y haberme apoyado en toda esta fase de mi vida.

A mis compañeros y amigos de la universidad, por ayudarme y enseñarme a que la ingeniería se crea en equipo, y apoyarme en los momentos más difíciles del grado.

A mis amigos de toda la vida, por soportarme y entenderme en cada momento de este ciclo.



Página dejada en blanco intencionadamente



# Índice general

Agradecimientos.....	5
Índice .....	8
Resumen .....	14
Abstract .....	15
1. Introducción .....	16
1.1. Introducción .....	16
1.2. El LED.....	17
1.2.1. Ventajas del LED .....	18
1.2.2. Desventajas del LED .....	18
1.2.3. Aplicaciones del LED.....	18
1.3. Luz visible .....	20
2. Objetivos del proyecto .....	21
3. Sistema emisor .....	23
3.1. Circuito de acondicionamiento .....	23
3.2. Etapa moduladora .....	25
3.3. Etapa de potencia / driver .....	25
4. Sistema receptor .....	26
4.1. Etapa de captación y amplificación de la señal.....	27
4.2. Etapa Moduladora.....	28



4.3. Etapa de Amplificación.....	28
4.4. IOIO OTG.....	29
5. Características del sistema emisor .....	30
5.1. Etapa amplificadora.....	30
5.1.1. Acondicionamiento de la señal de audio .....	30
5.1.2. Transmisión de texto.....	36
5.2. Etapa Moduladora.....	40
5.3. Etapa de potencia o driver .....	47
6. Características del sistema receptor .....	53
6.1. Etapa de acondicionamiento.....	53
6.1.1. Convertidor I-V .....	53
6.1.2. Filtro Paso-Alto con Diodo .....	57
6.1.3. Amplificador Inversor.....	59
6.1.4. Comparador con histéresis .....	61
6.2. Etapa demoduladora .....	63
6.3. Etapa amplificadora.....	65
6.3.1. Amplificador de Audio.....	65
6.3.2. Comparador de histéresis para texto.....	67
6.4. IOIO OTG para Android .....	69
7. Alimentación de los circuitos.....	71
8. Creación de los circuitos impresos (PBAs).....	72
9. Montaje .....	76
10. Conclusiones y trabajos futuros .....	80





10.1.....	
Conclusiones finales .....	80
10.2.....	
Trabajos futuros .....	80
11. Referencias .....	82
12. Anexos .....	85
12.1.....	
Presupuesto.....	84
12.2.....	
Esquemáticos del circuito.....	87
12.3.....	
Hoja de Características .....	94

## Índice de figuras

Figura 1. Sistema de comunicaciones.....	14
Figura 3.1. Esquema de circuito emisor .....	23
Figura 3.2. Amplificador operacional funcionando como comparador .....	24
Figura 4.1. Esquema del circuito receptor .....	27
Figura 4.2. Ejemplo de funcionamiento comparador por histéresis .....	28
Figura 5.1. Señal de entrada de Audio al circuito, Vaudio .....	30
Figura 5.2. Señal de entrada de prueba. Vaudio .....	31
Figura 5.3. Esquema Amplificador de Audio .....	32
Figura 5.4. Amplificador de Audio – Tensión de referencia .....	33
Figura 5.5. Amplificador de Audio - Potenciómetro.....	34
Figura 5.6. Circuito de referencia .....	35
Figura 5.7. Señal amplificada, Vs1 .....	35
Figura 5.8. Señal de prueba amplificada, Vs1.....	36
Figura 5.9. Esquema del montaje del Conversor de señal .....	37
Figura 5.10. Señal de entrada de texto al circuito, Vtexto .....	37
Figura 5.11. Amplificador de Texto.....	38
Figura 5.12. Amplificador de Texto reducido .....	39
Figura 5.13. Variación de las frecuencias en función de las resistencias y el condensador .....	41
Figura 5.14. Modulador .....	41
Figura 5.15. Señal de salida del Modulador, Vsm .....	47
Figura 5.16. Etapa de potencia / Driver .....	48
Figura 5.17. Funcionamiento del MOSFET.....	48
Figura 5.18. Funcionamiento para 5V – BJT BC547B.....	49



Figura 5.19. Funcionamiento para 0V – BJT BC557B .....	50
Figura 5.20. Subcircuito MOSFWT IRF530 .....	51
Figura 5.21. LED W11492 Señal de salida del Modulador, Vsm .....	51
Figura 5.22. Alimentación del driver y LEDs .....	52
Figura 6.1. Fotodiodo BPW34 .....	53
Figura 6.2. Señal de salida Fotodiodo .....	54
Figura 6.3. Esquema convertidor I-V .....	56
Figura 6.4. Señal después del Esquema convertidor I-V .....	56
Figura 6.5. Filtro paso alto con diodo .....	57
Figura 6.6. Señal antes del filtro .....	58
Figura 6.7. Señal después del filtro .....	58
Figura 6.8. Amplificador Inversor .....	59
Figura 6.9. Señal después del inversor .....	60
Figura 6.10 Comparador con histéresis .....	61
Figura 6.11. Señal después del comparador .....	62
Figura 6.12. Esquema de montaje 74HCT4046 .....	63
Figura 6.13. Demodulador .....	64
Figura 6.14. Señal después demodulador .....	65
Figura 6.15. Esquema montaje LM386 .....	66
Figura 6.16. Amplificador de Audio .....	66
Figura 6.17. Señal de salida final para audio .....	67
Figura 6.18 Comparador con histéresis para texto .....	68
Figura 6.19. Señal de salida final para texto .....	69
Figura 6.20. IOIO OTG .....	69
Figura 6.21. Placa de conexión y alimentación para el IOIO .....	70
Figura 7.1. Esquema de montaje LM7805 .....	71
Figura 7.2. Fuente de alimentación LM7805 .....	71



Figura 7.3. Fuente de alimentación LM7806 .....	72
Figura 8.1. Placa Emisor, Capa TOP .....	74
Figura 8.2. Placa Emisor, Capa BOTTOM .....	74
Figura 8.3. Placa Receptor, Capa TOP .....	75
Figura 8.4. Placa Receptor, Capa BOTTOM.....	75
Figura 9.1. Montaje circuito Emisor .....	76
Figura 9.2. Montaje circuito receptor.....	77
Figura 9.3. Conexiones con componentes externos - Emisor .....	78
Figura 9.4. Conexiones con componentes externos – Receptor .....	79



## Índice de tablas

Tabla 5.1. Datos teóricos 74HCT4046 extraídos de <a href="http://www.changpuak.com">www.changpuak.com</a> ...	44-45
Tabla 5.2. Fout vs Vin.....	46
Tabla 12.1. Tabla de costes materiales.....	84
Tabla 12.2. Tabla de costes de personal.....	86
Tabla 12.3. Costes totales.....	86

## Índice de gráficas

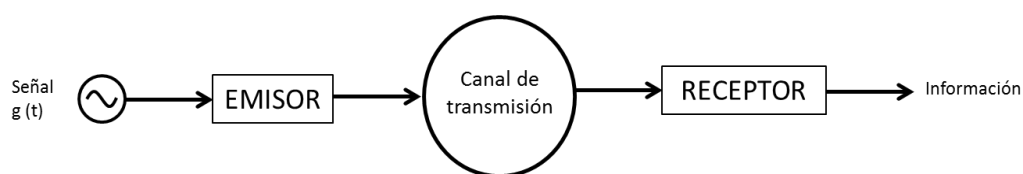
Gráfica 5.1. Relación la desviación típica y el producto entre R10 y C2 .....	43
Gráfica 5.2. Valor típico de offset .....	44

## RESUMEN

Se ha implementado un sistema físico de transmisión de datos por LEDs basado en luz visible. El sistema está dividido a grandes rasgos en un emisor que utilizaremos para enviar la información que queremos transmitir y un receptor que se encargará de recoger esa información y tratarla de manera que podamos usarla lo más adecuadamente a nuestras necesidades. También resaltar que el sistema tiene dos configuraciones para transmitir señales digitales y analógicas.

El emisor está dividido en tres subcircuitos que se encargarán de manipular la señal electrónica procedente del ordenador. Se han diseñado un sistema de acondicionamiento de la señal, un modulador para conseguir una señal digital para la conmutación posterior de los LEDs y un circuito de potencia o driver para el control de la intensidad y la temperatura a la que están sometidos los LEDs.

Por otro lado tenemos el sistema de recepción dividido en varias etapas. Se ha utilizado un sistema de fotodetectores para la captación de la potencia óptica de la señal procedente los LEDs, con un inversor de intensidad a tensión para que la señal pueda ser utilizada en nuestro demodulador. A continuación se tienen tres montajes para poder tratar la señal y convertirla en una señal cuadrada y amplificada. Tendremos una etapa demoduladora para obtener nuestra señal original y una etapa amplificadora para el audio o una etapa para el texto que nos convertirá la señal en otra señal cuadrada digital para su uso en el equipo.



**Figura 1. Sistema de comunicaciones**



## ABSTRACT

The aim of this is to explain the hardware implementation for a system of high performance communications based on visible light LEDs.

The system is divided in an emitter which is used to send the signal with information, text or audio that we want to transmit. A receiver is the responsible for trapping this signal. We can use in an appropriate way and for our needs, without losing of the information. The system also has two configuration to transmit digital signals (text from a CPU) or analogic signals (audio).

The emitter is divided into three sub-circuits which are responsible for handling the electronic signal from a computer. It has been designed a system for conditioning the signal, a modulator for getting a digital signal for further switching of the LEDs and a driver for controlling the intensity and temperature at which LEDs are submitted.

On the other hand we have the receiving system divided into several stages. System of photodetectors is used for catching the optical power of the signal from the LEDs, a voltage-intensity inverter to transform a voltage signal. A multi-stage treat to process and amplify the signal for using by demodulator. We have a demodulator stage to obtain the original signal with the information. The ending stage is divided in two sub-circuits, a signal converter stage for the text, and an amplification stage for the audio.



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. INTRODUCCIÓN

La gran afluencia de las nuevas tecnologías en los últimos quince años ha hecho que suframos un cambio social crucial. La evolución de los sistemas portátiles frente a sistemas fijos ha convertido la tecnología en la influencia de las nuevas generaciones y por tanto, en la libertad de la comunicación entre diferentes personas. Una comunicación de información infinita al alcance de cualquiera, desde su propia casa, transmitida desde cualquier parte del mundo.

La transmisión de datos siempre ha sido uno de los mayores problemas en el mundo de las telecomunicaciones y la electrónica. Sistemas capaces de procesar una información masiva y enviarla a un sistema receptor sin pérdida de datos y con una calidad óptima.

En un planeta donde cada día se guardan y se transmite más información, son necesarios sistemas cuyo funcionamiento no suponga una gran cantidad de gasto energético y que sean fáciles en su uso por parte del consumidor. A parte de que sean sistemas económicamente accesibles y lleguen a cualquier persona.

Actualmente la información puede ser transmitida a través de diferentes sistemas como Wi-fi, Bluetooth, 3G, 4G, sistemas de radiofrecuencia y geolocalización como los GPS, o sistemas eléctricos. Pero en los últimos años los sistemas ópticos y de percepción están aumentando en el mercado de las tecnologías, desde el uso de láser y sistemas RFID para el control en la industria, hasta en aplicaciones en sistemas portátiles, como smartphones y tablets, basados en sistemas de reconocimiento.

¿Qué es lo que necesitan las personas para realizar su vida cotidiana? La luz.

La luz, de forma natural, es una fuente inagotable que puede ser utilizada para diferentes causas y que poco a poco se está convirtiendo en la materia más utilizada en el mundo de la industria.

En los últimos diez años ha habido una gran proliferación de los sistemas de luz de bajo consumo en lámparas incandescentes y fluorescentes, gracias también a un cambio de conciencia social por el cuidado del medioambiente. Pero en la constante búsqueda de ingenieros y expertos en el tema, se ha llegado a la implantación y al





constante crecimiento que estamos tendiendo actualmente, de los sistemas de luz de bajo consumo y alto rendimiento a través del uso de LEDs.

## 1.2. EL LED

El LED (del acrónimo en inglés de light-emitting diode), es un componente optoelectrónico pasivo y, más concretamente, un diodo que emite luz. Su principal función es convertir la energía eléctrica en una fuente luminosa.

Para crear un diodo LED [6] [9] habitualmente se unen dos regiones “N” y “P”, como si de un diodo rectificador común se tratara. En la zona de la unión de esas dos regiones se forma, igualmente, una barrera de potencial, cuya función es impedir el paso de los electrones desde la región negativa “N” hacia la positiva “P” cuando no se encuentran debidamente polarizados y los electrones no poseen la suficiente energía para poder atravesarla. Cuando se polariza el dispositivo, es decir, aplicamos a los extremos del LED una tensión o voltaje positivo ánodo-cátodo, los electrones provenientes de la zona N comienzan a fluir a través del diodo. Bajo esas condiciones, cada vez que un electrón en exceso con carga negativa (–) presente en la región “N” adquiere la suficiente energía como para poder traspasar la barrera de potencial, se combina con un hueco positivo en exceso en la región “P”. En el mismo instante que ocurre esa combinación, la energía en exceso que adquirió dicho electrón para poder atravesar la barrera de potencial, se transforma en energía electromagnética, que libera, en ese preciso momento, en forma de fotón de luz.

El primer LED fue desarrollado en 1927, sin embargo a la industria no llegó hasta la década de 1960. Solo se podían construir de color rojo, verde y amarillo y además con escasa o poca intensidad de luz lo cual limitaba enormemente su utilización a mandos a distancia y electrodomésticos para marcar el encendido y apagado.

A finales del siglo pasado se inventaron los LEDs ultravioletas y azules, lo que dio paso al desarrollo del LED blanco.

Los LED blancos se basan habitualmente en una emisión azul con recubrimiento de fósforo que produce una luz amarilla, la mezcla del azul y el amarillo produce una luz blanquecina consiguiendo alta luminosidad con lo cual se ha ampliado su utilización en sistemas de iluminación. También se puede generar luz blanca a partir de la emisión de tres luces LED de tres primarios fundamentales tales como el rojo, verde y azul.

Como cualquier tipo de material y tecnología, los LEDs presentan una serie de ventajas y desventajas, que en conocimiento de ellas nos permitirá conocer sus bondades y limitaciones en las diversas aplicaciones.

### **1.2.1. VENTAJAS DEL LED**

A continuación se citan algunas de las ventajas [6] [10] de este tipo de emisores frente a otros disponibles comercialmente (halógenos, fluorescentes, etc.):

- Bajo consumo energético siendo más eficientes que las tradicionales lámparas incandescentes y fluorescentes, dado a que emiten mayor luminosidad por Vatio consumido.
- Pueden ser fabricados con un tamaño muy reducido, permitiendo ser insertados en circuitos electrónicos y aparatos de tamaño reducido.
- Son muy resistentes tanto a vibraciones como a impactos, disponiendo de una alta tasa de fiabilidad y durabilidad, disponiendo de una vida media 50 veces superior que las luces incandescentes.
- Disponen de tiempos de encendido y apagado inferiores a 1 milisegundo, no reduciéndose su vida útil por el encendido intermitente.

### **1.2.2. DESVENTAJAS DEL LED**

Su principal desventaja [6] [10] es su alta dependencia a la temperatura, disminuyendo la luminosidad y la vida útil cuando aumenta la temperatura y calor al que se encuentran expuestos, disponiendo de problemas de fiabilidad cuando se exponen a cambios abruptos de temperatura.

Al ser una tecnología relativamente nueva el coste de adquisición inicial es más elevado comparado con las tradicionales fuentes incandescentes y fluorescentes, pero su ahorro viene determinado por su bajo consumo así como su extensa vida útil.

### **1.2.3. APLICACIONES DEL LED**

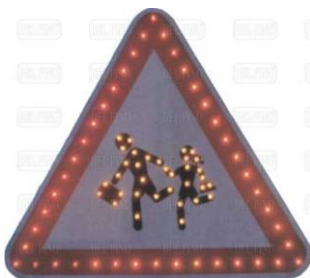
El primer sector en utilizar los LEDs fue el sector electrónico, debido a su reducido tamaño, su bajo consumo y su rápido encendido y apagado, los LEDs son los candidatos

ideales para la señalización luminosa del estado de encendido, apagado u otro tipo de información en pequeños aparatos como placas electrónicas, calculadoras, displays, etc.

Los LEDs invisibles o infrarrojos son utilizados para enviar información entre diferentes aparatos electrónicos, los mandos a distancia de nuestros televisores, puertas de garajes o de nuestro aire acondicionado son ejemplos cotidianos donde se utilizan los LEDs infrarrojos, por otro lado a principios del siglo XXI fueron ampliamente utilizados en la comunicación entre ordenadores y teléfonos móviles, siendo actualmente sustituidos por la tecnología bluetooth.

Con el desarrollo en los años 90 de los LEDs luminiscentes estos se están aplicando con éxito en diversas áreas de iluminación, hoy en día disponemos de farolas que alumbran nuestras calles nocturnas mediante este tipo de LEDs, miles de escaparates, museos, casas e incluso industrias de todo el mundo están iluminados con LEDs, incluso el flash que ilumina la cámara de fotos de tu móvil o smartphone es un LED.

Señales de tráfico, faros de coches y locomotoras, pantallas de señalización del tráfico, displays informativos, pantallas de televisión gigantes utilizadas en eventos deportivos, musicales u otros, son ejemplos donde los LEDs es el elemento básico de su fabricación y funcionamiento.



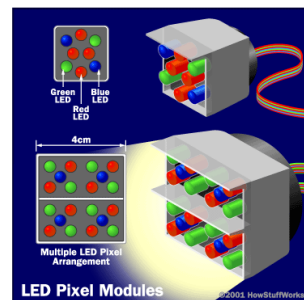
**Señalización**



**Luminaria**



**Faros de coches**



**Foco de TV**

**Figura 1.1. Ejemplos de aplicaciones con LEDs**



## 1.3. LUZ VISIBLE

En términos físicos, la luz se corresponde con una onda del espectro electromagnético, en el cual la luz visible es la radiación específica en el espectro visible al ojo humano, comprendida en unas longitudes de onda de 400 a 700 nm aproximadamente [11].

Actualmente, y cada vez más, están siendo utilizadas las instalaciones de LEDs basadas en luz visible en nuestra vida cotidiana. Luminarias de interior y de exterior, vehículos propios, aparatos electrónicos, etc.

En el trabajo fin de grado que aquí se presenta, la luz visible es la onda portadora que se utiliza para el envío de la información que se quiere transmitir. Es la luz artificial que tenemos a nuestro alrededor y que mejor forma es utilizarla para fines más allá del alumbrado básico.

## 2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

Este trabajo tiene como objetivo fundamental la transmisión de la información en entornos indoor basado en luz visible.

Para conseguirlo se ha construido un sistema de comunicaciones ópticas, a través de la utilización de LEDs específicos de iluminación capaces de conmutar a altas velocidades para poder transmitir altas tasas de información.

Se ha realizado un montaje físico del sistema dividido en diferentes partes donde manipular la información a transmitir de la manera más adecuada para su fin. En el transcurso de este montaje se han realizado pruebas de ensayo con las diferentes partes para conseguir la mayor efectividad en la transmisión de la información.

En resumen, los objetivos más concretos planteados para este proyecto son los siguientes:

1. Desarrollar un sistema de comunicaciones basado en luz visible (utilizando LEDs de bajo coste como fuentes ópticas y fotodetectores estándar comerciales de área ancha) que sea capaz de llevar embebida o codificada información de audio y/o texto.
2. El usuario puede captar dicha información de accesibilidad haciendo uso de un pequeño receptor óptico que recoge la luz visible y decodifica los datos/información enviada desde el emisor.

Un escenario de uso –no exclusivo– de este sistema podría ser, por ejemplo el caso de una persona ciega que mediante un pequeño receptor conectado con unos cascos puede estar recibiendo instrucciones (mensajes sonoros) a través de la señal de luz de cómo ejecutar determinadas tareas de su actividad laboral. El resultado esperable es que este sistema permitiría mejorar la eficiencia en el periodo de aprendizaje del usuario y, podría utilizar también esta herramienta en su quehacer laboral cotidiano.

La aportación sustancial de esta propuesta innovadora y de bajo coste es que se trata de un sistema confinado espacialmente al área o celda que ilumina la luz del LED, la cual puede ser fácilmente reconfigurable mediante un sistema óptico externo (lentes). Además es discreto, y no interfiere con otro tipo de señales radio que puedan existir en el área de trabajo en que se desarrolla la actividad laboral del usuario. Por tanto, este sistema no está sometido a una normativa rígida en cuanto a niveles de potencia de la



señal que pueden ser utilizados sin riesgo para las personas como ocurre en el caso de zigbee o bluetooth.

Dicho proyecto se encuentra ubicado en el departamento de Tecnología Electrónica, en la Universidad Carlos III de Madrid, término municipal de Leganés, provincia de Madrid.

El sistema de transmisión puede ser utilizado en diferentes dispositivos, principalmente dispositivos móviles.

La memoria técnica se ha redactado de manera que cumpla con las normativas de aplicación impuestas por la universidad Carlos III de Madrid.

### 3. SISTEMA EMISOR

El emisor es el dispositivo encargado de modular la señal de audio o texto procedente de una fuente externa, como puede ser la tarjeta de sonido de un ordenador o un convertor de una señal digital. Tras la modulación de los datos, la señal es acondicionada para poder atacar los LEDs encargados de iluminar y a la vez transmitir la información en el espectro de la luz visible.

Tendremos un sistema emisor constituido por tres bloques diferenciados por su función de manipulación de la señal, dentro del circuito: etapa de acondicionamiento de la salida de audio y de ID, etapa de modulación y etapa de potencia o driver (donde están incluidos los LEDs de emisión).

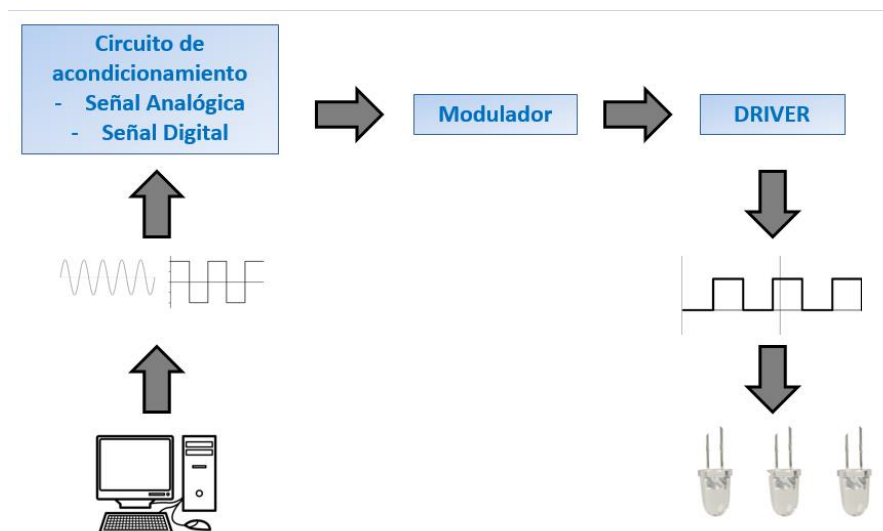


Figura 3.1. Esquema de Circuito emisor

#### 3.1. Circuito de acondicionamiento

Un acondicionador de señal es un dispositivo que convierte un tipo de señal electrónica en otro tipo de señal eléctrica con valores de sus parámetros mejor adaptados (amplitud, fase, frecuencia, valor medio, etc.). Su uso principal es convertir una señal, que puede ser difícil de leer por la instrumentación convencional, en un

formato más fácil de leer. Al realizar esta conversión, puede tener lugar una serie de funciones. Estas incluyen:

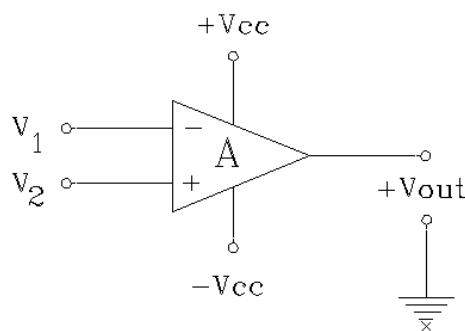
- Amplificación: la magnitud de la señal es aumentada para un mejor manejo.
- Aislamiento: se realiza una rotura de la conexión galvánica (a través de la señal óptica) de manera que la señal de entrada se convierta en una señal más “limpia” para poder ser reconstruida posteriormente en el circuito receptor. El aislamiento también se utiliza para evitar bucles.
- Linealización: es la conversión de una señal de entrada no lineal a una señal de salida lineal.

El circuito de acondicionamiento está dividido en dos subcircuitos, uno para el acondicionamiento de la señal analógica de audio y otro para la señal digital de texto.

Se ha llevado a cabo el control del nivel de la señal de audio de entrada, la cual puede proceder de diferentes fuentes. Esto nos ayudará a evitar posibles distorsiones. La señal está limitada a un ancho de banda de 20kHz.

La señal de audio será atenuada por un potenciómetro, más conocido en los sistemas de audio como control de volumen.

El amplificador operacional MC34071, está funcionando como un comparador. Esta configuración del operacional ha sido utilizada para controlar la amplitud de la señal.



**Figura 3.2. Amplificador operacional funcionando como comparador**

De esta manera a parte de controlar la amplitud de la señal, acondicionamos esta para que sea manejable para el sistema de modulación posterior.





Con otro potenciómetro podremos controlar la entrada de tensión al modulador en el caso de que no recibamos ninguna señal de audio y establecer un voltaje fijo.

Para el control de la señal digital se ha diseñado un sumador no inversor ponderado.

Este diseño nos ayuda como sistema de transmisión de nuestra señal digital y convierte en la señal de entrada en una señal cuadrada apta para ser modulada bajo el rango que nos estipula el modulador elegido.

### **3.2. Etapa moduladora**

La modulación por desplazamiento de frecuencia o FSK (del acrónimo en inglés de Frequency Shift Keying) es una técnica de modulación para la transmisión digital de información, utilizando dos o más frecuencias diferentes para cada símbolo. La señal moduladora solo varía entre dos valores de tensión discretos formando un tren de pulsos donde uno representa un "1" y otro representa "0".

Para construir el modulador se ha elegido un semiconductor, 74HCT4046, con una configuración VCO. Ha sido alimentado con un valor de tensión de 5V. Tendremos un valor de frecuencia a la salida del modulador entre 40 y 60 KHz, de tal modo que obtengamos una frecuencia central de 50KHz. De este modo tendremos una desviación máxima de 20KHz.

### **3.3. Etapa de potencia / driver**

Se ha diseñado un driver de potencia para el control del disparo de conmutación de los LEDs y por tanto de la intensidad que pasa por ellos. Esto nos evitará sobrecalentamientos en los dispositivos LEDs y un buen funcionamiento a la hora de transmitir toda la información que recibimos del modulador.

El puente está formado por dos transistores bipolares, BJT (de las siglas en inglés Bipolar Junction Transistor), conectados emisor-colector y base común. Los transistores se basan uno en la configuración NPN y el otro en la configuración PNP.



Por otro lado tendremos un MOSFET de enriquecimiento (de las siglas en inglés Metal-oxide-semiconductor Field-effect transistor), conectando su compuerta G a la conexión emisor-colector de los BJT.

El funcionamiento de esta etapa es sencillo. Los transistores conducirán uno u otro dependiendo de la señal de entrada en su base. Este funcionamiento proporcionará una tensión a la entrada del MOSFET (Gate “G”). Si la tensión entre la puerta y la fuente (Source “S”) es la adecuada estipulada por el fabricante, el MOSFET conducirá y por tanto el LED se encenderá.

Con este Driver lo que tratamos es de conseguir transmitir el tren de pulsos que recibimos del modulador a través de encendidos y apagados del LED, de manera que cuando enciende el MOSFET estará en cortocircuito y cuando está apagado el MOSFET se comportará como un circuito abierto.

## 4. SISTEMA RECEPTOR

El sistema receptor es un dispositivo portátil de reducidas dimensiones, formado por un fotodiodo que recibirá la información transmitida por el emisor dentro de un rango de funcionamiento. Esta señal pasará por una serie de filtros para luego ser amplificada y de este modo acondicionar la señal para poder realizarse la demodulación. Una vez recuperada la información, la señal es amplificada para poder atacar unos auriculares.

Tendremos un sistema receptor constituido por cuatro bloques: un sistema de fotodetectores para poder captar la potencia óptica y por tanto la información que nos envía el emisor, un sistema de postdetección que está compuesto por un demodulador de señal y un sistema de acondicionamiento de la señal y, por último, una etapa amplificadora de la señal que estará conectada a nuestro sistema de reproducción de la información.

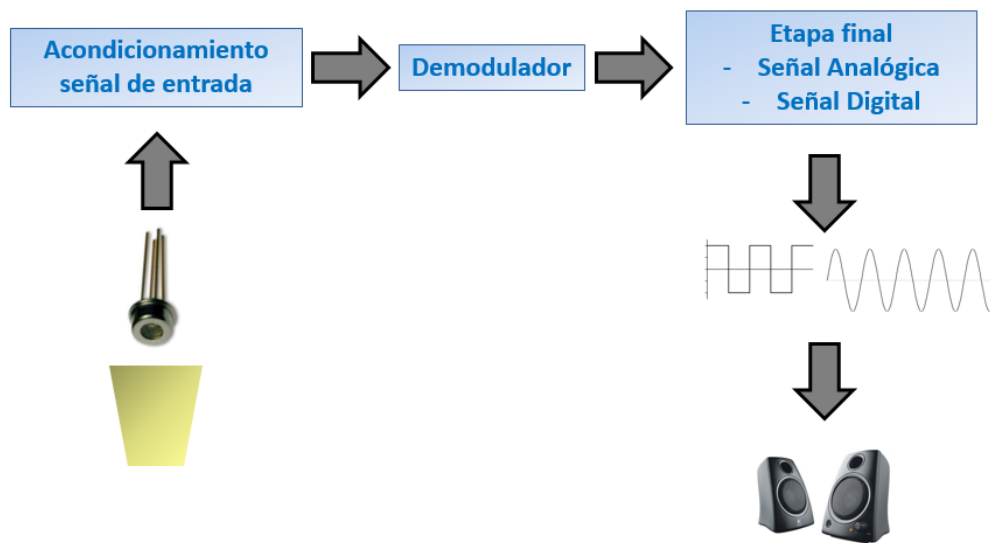


Figura 4.1. Esquema del circuito receptor

## 4.1. Etapa de captación y amplificación de la señal

La etapa de captación y amplificación de la señal ha sido diseñada para la captura de la señal de intensidad que nos proporciona el fotodiodo y para la amplificación de esta señal de manera que pueda ser manejada posteriormente por el demodulador.

La señal de intensidad será transformada en una señal de tensión gracias a un sub-circuito convertidor. Posteriormente filtraremos la señal para que sea más limpia y la amplificaremos.

Con la señal amplificada y, gracias a un comparador por histéresis, o comparador Schmitt, conseguiremos una señal cuadrada de entrada para el demodulador dentro de los parámetros estipulados.

El Schmitt usa la histéresis [1] [2] para prevenir el ruido que podría tapar a la señal original y que causaría falsos cambios de estado si los niveles de referencia y entrada son parecidos.

Para su implementación se suele utilizar un amplificador operacional realimentado positivamente. Los niveles de referencia pueden ser controlados ajustando las resistencias de la trama de realimentación.

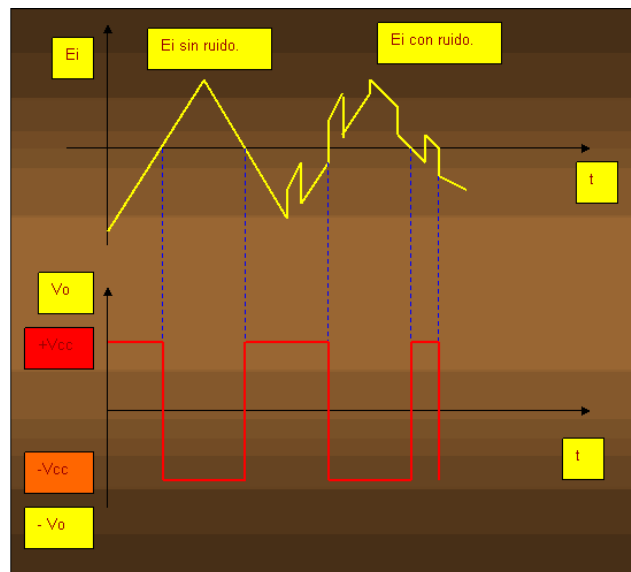


Figura 4.2. Ejemplo de funcionamiento comparador por histéresis

## 4.2. Etapa demoduladora

Demodulación es el acto de extracción de la señal portadora de información original a partir de una onda portadora modulada. Un demodulador es un circuito electrónico que se utiliza para recuperar el contenido de información de la onda portadora modulada.

Para la demodulación de la señal se ha utilizado el mismo circuito integrado, 74HCT4046, con una configuración VCO. Con esto hemos generado un tren de pulsos con una frecuencia dependiente de una tensión de entrada.

Como el modulador, el demodulador también estará alimentado por una señal continua de 5 V de valor.

## 4.3. Etapa amplificación de la señal

Se tendrá una señal de amplificación como última etapa donde incrementaremos la señal que nos ha proporcionado el demodulador.



Dependiendo de la señal que estemos transportando se diseñaron dos tipos de amplificador.

Para la amplificación de la señal de audio se ha utilizado un LM386 que nos proporcionará una ganancia entre un valor mínimo de 20 y un valor máximo de 200. De este modo podríamos regular el volumen del audio desde nuestro diseño sin necesidad de hacerlo desde el dispositivo que nos proporciona la señal a tratar y transportar.

Para la amplificación de la señal de texto hemos utilizado un comparador por histéresis, que convertirá nuestra señal sinusoidal demodulada en un nuevo tren de pulsos digital para que nuestro dispositivo (PC o Tablet) pueda leer la información.

## 4.4. IOIO OTG

El IOIO es una placa específicamente diseñada para trabajar con dispositivos Android (versión del OS superior a v1.5). Proporciona una conectividad robusta con un dispositivo Android por conexión USB y es totalmente controlable desde una aplicación Android usando una simple e intuitiva API de JAVA llamada IOIO Manager.

El IOIO contiene un pequeño microcontrolador que actúa como USB Host e interpreta las peticiones de la aplicación Android. Por otro lado, el microcontrolador puede interactuar con otros dispositivos físicos conectados al mismo tales como sensores, actuadores etc. utilizando las señales y protocolos convencionales tales como entradas y salidas digitales, PWM, entradas analógicas, I2C, SPI y UART, todas ellas pueden ser utilizadas. El IOIO permite aprovecharse de la gran potencia de cálculo de los dispositivos móviles con Android, Internet/Bluetooth, conectividad Wifi, touchscreen y conectarlo con periféricos externos de forma sencilla. [12]

## 5. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA EMISOR

A continuación se realizará una descripción más detallada de los diferentes bloques funcionales que componen el emisor.

### 5.1. Etapa amplificadora

#### 5.1.1. ACONCIONAMIENTO DE LA SEÑAL DE AUDIO

De un reproductor de música obtendremos la señal de audio que podemos observar en la figura 5.1. Esta señal la debemos de acondicionar para obtener una señal más manejable para su posterior modulación.

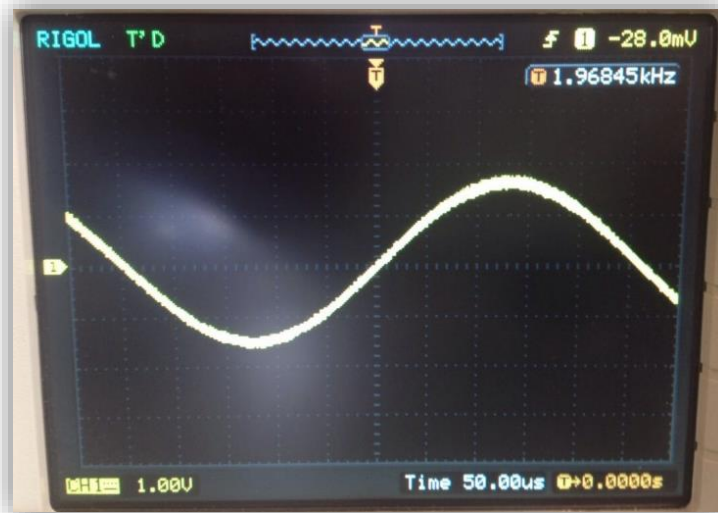


Figura 5.1. Señal de entrada de Audio al circuito, Vaudio

En la captación del osciloscopio nos da una señal de aproximadamente 1Vpp con una frecuencia menor a 5Hz. El ancho de banda audible (rango de 200Hz a 100kHz) es hasta 20kHz aproximadamente. Este dato del osciloscopio es debido a la cantidad de armónicos que obtenemos del audio y que éste no puede captar con exactitud.

Para realizar un montaje más exacto y evitar los armónicos de la señal hemos realizado pruebas introduciendo al circuito una señal sinusoidal con el generador de señales. Esta señal es de un valor de 3V con una frecuencia de 2KHz.

La señal de prueba la podemos apreciar en la figura 4.2.



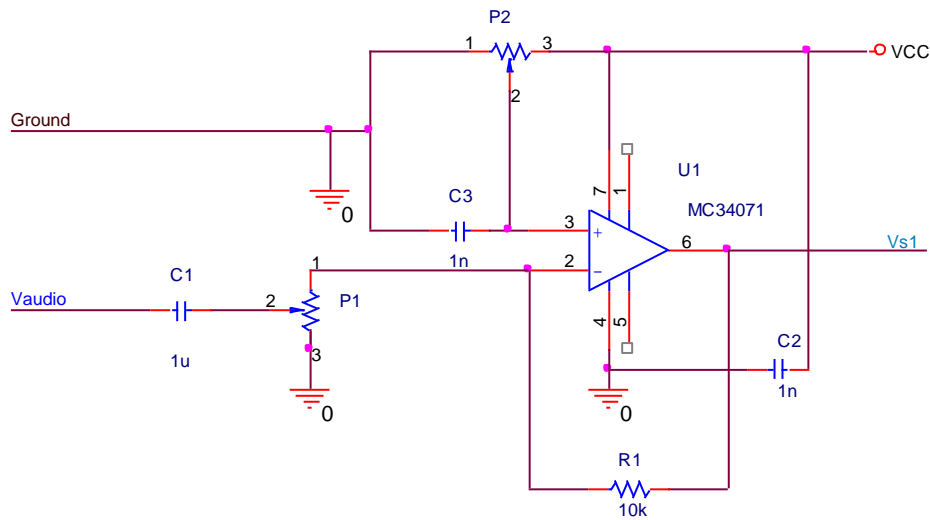
**Figura 5.2. Señal de entrada de prueba, Vaudio**

Esta señal la deberemos tratar para poder usarla posteriormente con un modulador de señales en modo FSK. Esto es, debemos conseguir una señal que este entre dos valores concretos de tensión.

Para ello se ha diseñado un sub-circuito [1] [3] compuesto por el amplificador operacional (MC34071), dos potenciómetros con lo que regularemos las señales de entrada al amplificador, y una serie de condensadores que nos servirán para disminuir el rizado de las señales de entrada al amplificador.

Se ha elegido este amplificador operacional porque lo podemos alimentar con una tensión mínima de 3V y tiene un excelente margen de ganancia.

En la figura 5.3 se puede observar el montaje realizado.



**Figura 5.3. Esquema Amplificador de Audio**

En primer lugar debemos tener en cuenta que, cuando no tengamos señal de audio, es decir, Vaudio con un valor de 0V, la salida del amplificador debe ser de un valor igual a la mitad del valor de alimentación del modulador de la siguiente etapa. El valor de alimentación del modulador es de 5V, por tanto, el valor de Vs1 deberá ser de 2,5V para este caso.

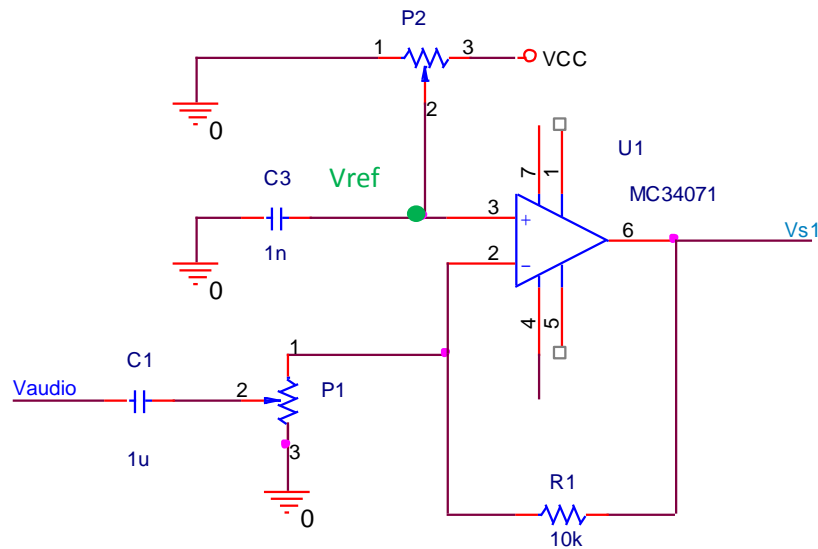
Para obtener esta señal de 2,5V hemos incorporado a nuestro circuito el potenciómetro P2, con el que trataremos de regular la señal de tensión introduciendo una tensión continua, es decir, introducimos una señal de offset al circuito.

La influencia de la tensión procedente de la regulación del potenciómetro P2, se podrá observar en el osciloscopio (pinchando en la salida del amplificador), de manera que nuestra señal se desplazará en el eje Y.

Tenemos también el potenciómetro P1, que lo usaremos para atenuar la señal de salida.

Con la combinación de estos dos potenciómetros deberemos obtener una señal de salida comprendida entre 0,9 V y 4,1 V, los valores necesarios para el buen funcionamiento de la etapa de modulación. De manera que, dependiendo de la señal de la señal de audio que tengamos a la entrada de deberán regular estos dos potenciómetros.





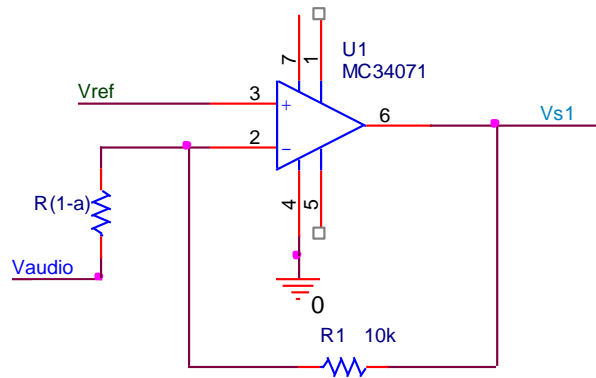
**Figura 5.4. Amplificador de Audio – Tensión de referencia.**

Hemos introducido una señal de tensión de referencia y comprobado que modificando el potenciómetro P1 y P2 obtenemos la señal necesaria para el modulador.

Se ha utilizado un potenciómetro de una resistencia máxima de 10 k $\Omega$  para la rama de la tensión de referencia y un potenciómetro de 100 k $\Omega$  para la ganancia del amplificador.

En la figura 5.2 tenemos un  $V_{min}$  de entrada de -1.5 V y una entrada máxima de 1.5 V que fue utilizada para demostrar el funcionamiento correcto de la etapa. El amplificador de audio convertirá esta señal en otra sinusoidal de salida con los siguientes valores:

- Para -1,5V obtendremos una señal de salida de 0,9V.
- Para 1,5V obtendremos una señal de salida de 4,1V.



**Figura 5.5. Amplificador de Audio - Potenciómetro**

$$R_x = R(1 - \alpha)$$

Analizamos el amplificador de audio:

$$V_{s1}|_{V_{ref}=0} \rightarrow \frac{V_{audio} - 0}{R_x} = \frac{0 - V_{s1}}{R_1} \rightarrow V_{s1} = -V_{audio} * \left(\frac{R_1}{R_x}\right)$$

$$V_{s1}|_{V_{audio}=0} \rightarrow \frac{0 - V_{ref}}{R_x} = \frac{V_{ref} - V_{s1}}{R_1} \rightarrow V_{s1} = V_{ref} * \left(1 + \frac{R_1}{R_x}\right)$$

$$V_{s1} = V_{ref} * \left(1 + \frac{R_1}{R_x}\right) - V_{audio} * \left(\frac{R_1}{R_x}\right)$$

R<sub>x</sub> corresponde a una de las partes resistivas del potenciómetro P1 que, dependiendo de la señal de entrada de audio que tengamos deberá ser modificado para atenuar la señal de salida del amplificador operacional correctamente.

La tensión de referencia viene dada por el potenciómetro P2.



Figura 5.6. Circuito de referencia

$$\text{Para } P_2 \rightarrow R' = R(1 - \alpha) \text{ y } R'' = R\alpha; V_{ref} = \frac{R''}{R'' + R'} * V_{cc}$$

$$V_{ref} = \frac{R\alpha}{R\alpha + R(1 - \alpha)} * V_{cc} = \frac{R\alpha}{R\alpha + R - R\alpha} * V_{cc} = \alpha * V_{cc}$$

A la salida del amplificador operacional se obtiene una señal que deberá estar entre un valor mínimo de 0.9V y un valor máximo de 4.1V. En la figura 5.7 se puede apreciar la señal real de audio. En la figura 5.8 la señal amplificada de prueba.

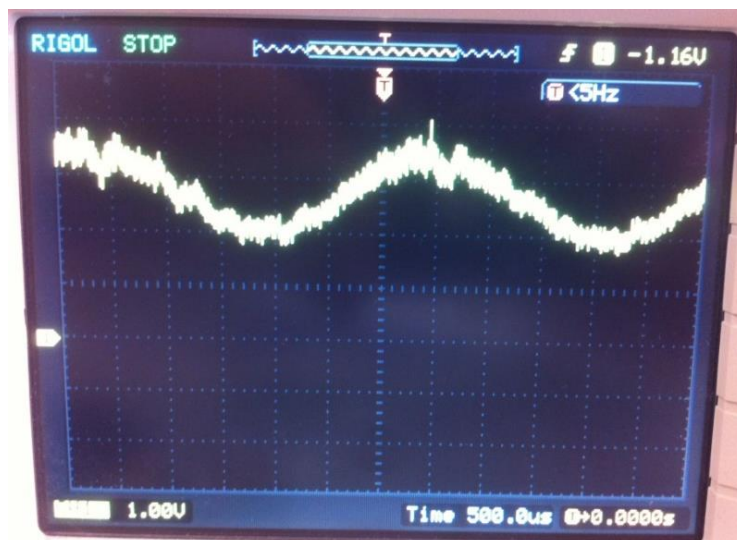
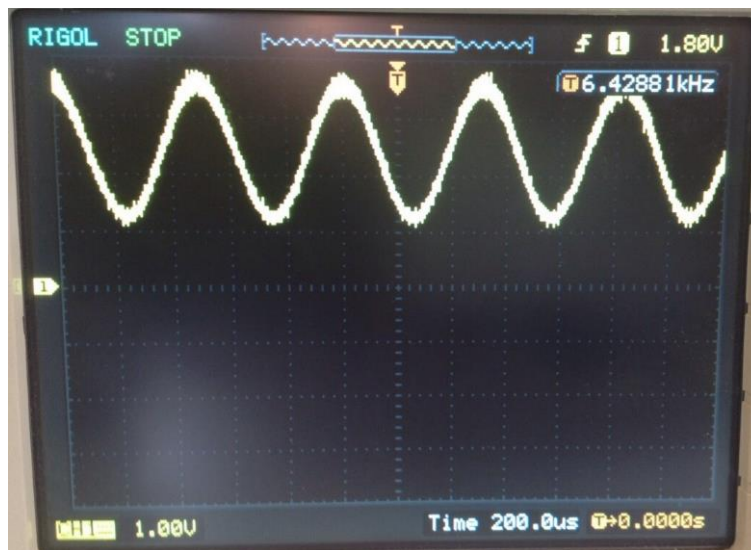


Figura 5.7. Señal amplificada, Vs1



**Figura 5.8. Señal de prueba amplificada, Vs1**

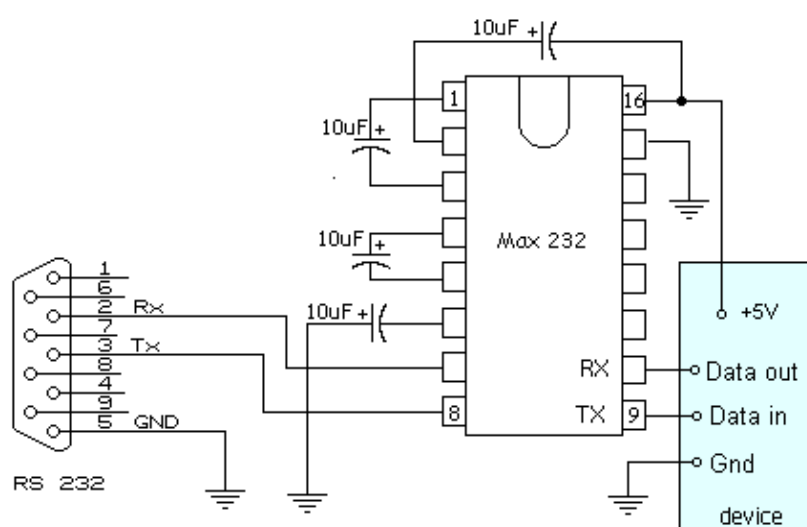
Con el condensador C1 se elimina la parte continua de la señal de entrada.

Con el condensador C2 se ha utilizado para filtrar posibles imperfecciones en la señal de referencia, de manera que no obstaculice la amplificación del sistema.

### **5.1.2. TRANSMISIÓN DE TEXTO**

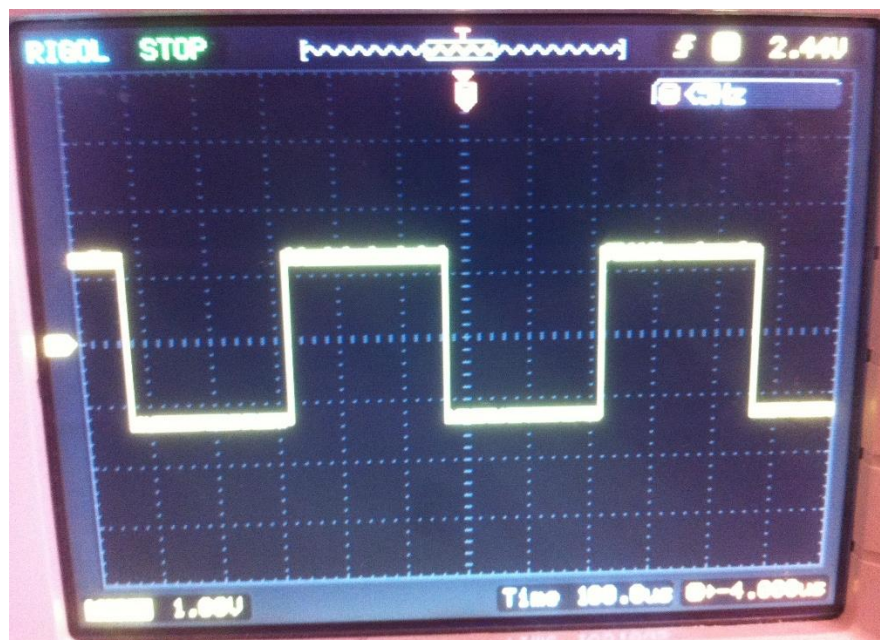
De una CPU se obtiene una señal digital cuadrada entre -12V y 12V. Esta señal se debe convertir en otra señal cuadrada en un rango de tensión con un valor mínimo de 0V y un valor máximo de 5V, para su posterior manejo en el circuito.

Se ha diseñado un conversor [1] [3] para pasar de un rango a otro la señal de texto. Para diseñar este conversor se ha utilizado el driver/receiver MAX232. Este componente tiene la capacidad generar tensión con una alimentación mínima de 5V, aparte de transportar la información de la señal sin pérdidas en el proceso de conversión. Se puede ver el montaje de este conversor en la figura 5.9.



**Figura 5.9. Esquema del montaje del Conversor de señal**

El convertor nos dará una señal de tren de pulsos digital entre 0V y 5V. Esta señal la podemos observar en la figura 5.10.



**Figura 5.10. Señal de entrada de texto al circuito, Vtexto**

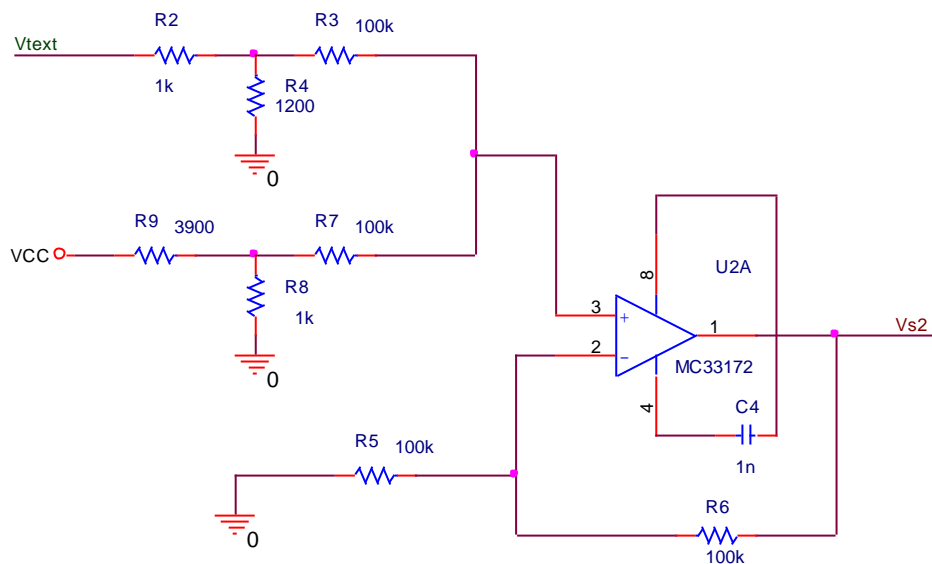
Esta señal debe ser tratada para poder usarla posteriormente con el mismo modulador de señales para el caso del audio, de manera que tengamos una señal entre 0,9 V y 4,1 V.

Para ello se ha diseñado un sumador no inversor ponderado [1] [3], compuesto por un amplificador operacional (MC34072), el cual tiene características similares al MC34071 utilizado anteriormente.

El sumador tendrá dos señales de entrada, la señal que transporta la información,  $V_{text}$ , y una señal de tensión continua  $V_{cc}$  de 5V. De este modo según sea la señal  $V_{text}$ , 5 o 0 V, tendremos un valor diferente en la entrada no inversora del amplificador.

Se ha incluido en el diseño un divisor de tensión para cada señal. De esta manera se obtendrán unos valores de tensión adecuados para su posterior amplificación.

En la figura 5.11 se puede observar el circuito diseñado.



**Figura 5.11. Amplificador de Texto**

Para las dos tensiones del sumador hemos diseñado dos divisores de tensión para aproximarnos al valor que necesitamos de salida  $V_{s2}$ , dependiendo de los valores de entrada de  $V_{text}$ .

$$V'_{text} = \frac{R_4}{R_2 * R_4} * V_{text} = \frac{1k\Omega}{1.2k\Omega * 1k\Omega} * V_{text} = 0.545 * V_{text}$$

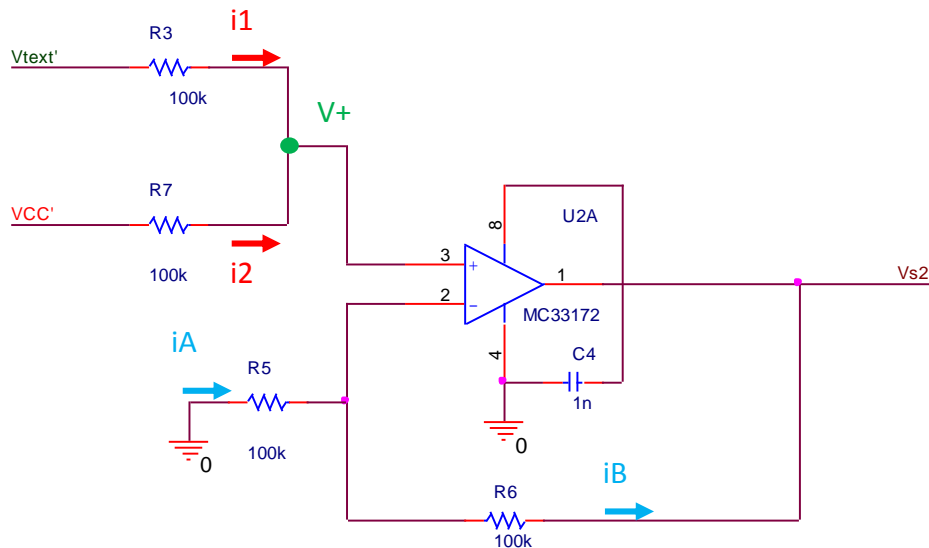
$$\text{Si } V_{text} = 0V \rightarrow V'_{text} = 0V$$

$$\text{Si } V_{text} = 5V \rightarrow V'_{text} = 2.725V$$

$$V'_{cc} = \frac{R_9}{R_8 * R_9} * V_{cc} = \frac{1k\Omega}{3.9k\Omega * 1k\Omega} * 5V = 0.204 * 5V = 1.02V$$

Con los dos nuevos valores de tensión se ha procedido a la amplificación de la señal de texto.

El circuito reducido se muestra en la figura 5.12. Se han marcado las intensidades que vamos a utilizar para el cálculo de la tensión de salida, Vs2.



**Figura 5.12. Amplificador de Texto reducido**

En las dos entradas del amplificador operacional MC33172 la corriente tiene un valor de 0 A por tanto:

$$\text{Como } I^+ = I^- = 0A \text{ y } I_1 + I_2 = I^+ \rightarrow \frac{V'_{text} - V^+}{R_3} + \frac{V'_{cc} - V^+}{R_7} = 0A$$

$$\frac{V'_{text}}{R_3} + \frac{V'_{cc}}{R_7} = \frac{V^+}{R_3} + \frac{V^+}{R_7} \rightarrow V^+ = \frac{\left[ \frac{V'_{text}}{R_3} + \frac{V'_{cc}}{R_7} \right]}{\left[ \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_7} \right]} \quad (1)$$

$$I_A = I_B \rightarrow \frac{0V - V^-}{R_5} = \frac{V^- - V_{s2}}{R_6} \rightarrow V_{s2} = V^- * \left(1 + \frac{R_6}{R_5}\right) \quad (2)$$

$$V^+ = V^- \rightarrow (1) \text{ y } (2) \rightarrow V_{s2} = \frac{\left[\frac{V'_{text}}{R_3} + \frac{V'_{cc}}{R_7}\right]}{\left[\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_7}\right]} * \left(1 + \frac{R_6}{R_5}\right)$$

$$V_{s2} = \frac{\left[\frac{V'_{text}}{100k\Omega} + \frac{1.02V}{100k\Omega}\right]}{\left[\frac{1}{100k\Omega} + \frac{1}{100k\Omega}\right]} \left(1 + \frac{100k\Omega}{100k\Omega}\right) = \left(\frac{V'_{text} + 1.02}{2}\right) * 2 = V'_{text} + 1.02$$

$$\text{Si } V_{text} = 0V \rightarrow V'_{text} = 0V \rightarrow V_{s2} = 1.02$$

$$\text{Si } V_{text} = 5V \rightarrow V'_{text} = 2.725V \rightarrow V_{s2} = 3.745$$

Para la señal cuadrada de salida hemos obtenido un valor máximo de 3.745 V y un valor mínimo de 1.02 V. Estos valores al igual que en la señal sinusoidal del sub-circuito de audio está entre el rango de 0.9V-4.1V.

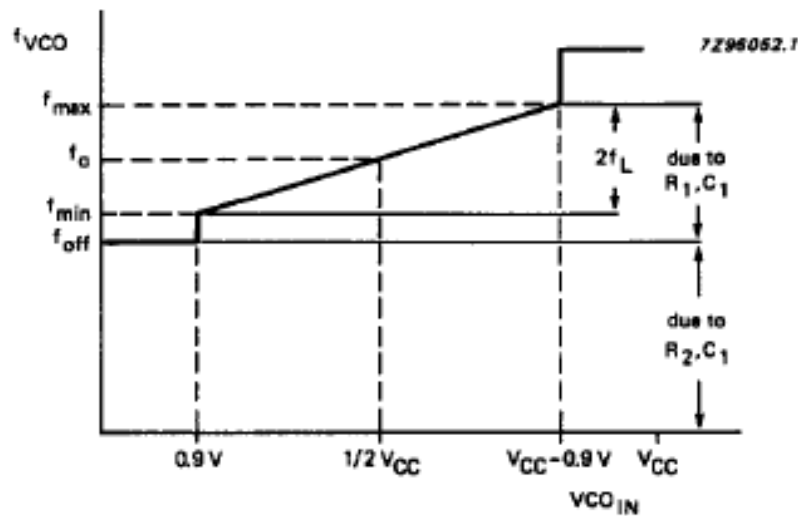
## 5.2. Etapa moduladora

Se ha diseñado un circuito de modulación con un semiconductor 74HCT4046, con una configuración VCO. El modulador está alimentado por una un valor de tensión de 5V.

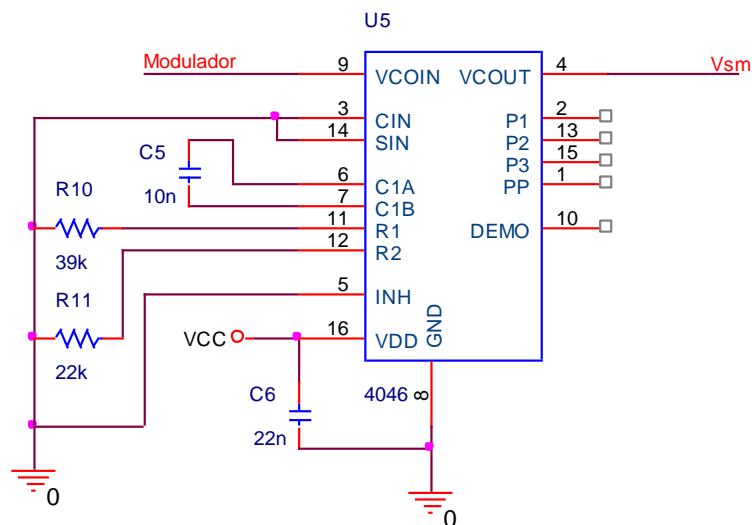
Tendremos un valor de frecuencia a la salida del modulador entre 40 y 60 KHz, de tal modo que obtengamos una frecuencia central de 50KHz. De este modo tendremos una desviación máxima de 20KHz.

Para un valor de entrada de 0,9 V tendremos el valor de frecuencia de salida de 40 KHz y para un valor de 4,1 V deberemos tener el valor de frecuencia de 60KHz.





**Figura 5.13. Variación de las frecuencias ( $f_{\min}$  y  $f_{\max}$ ) en función de las resistencias y el condensador.**



### Figura 5.14. Modulador

Para el diseño de la figura 5.14, los valores de las resistencias y condensador, hemos obtenido los datos a través de la hoja de características del modulador (anexo 12.3):

Obtenemos para un circuito VCO con desplazamiento de frecuencia:

$$3K\Omega < R_{11} \text{ Y } R_{10} < 300K\Omega$$

$$R_{11} || R_{10} > 2,7K\Omega$$

$$100nF < C_5 < 40pF$$

Condiciones teóricas:

*Alimentación: 5V*

*Frecuencia central ( $f_0$ ): 50 kHz*

*Desviación máxima ( $2f_L$ ): 20 kHz*

Resultados:

*Frecuencia central ( $f_{min}$ ): 40 kHz*

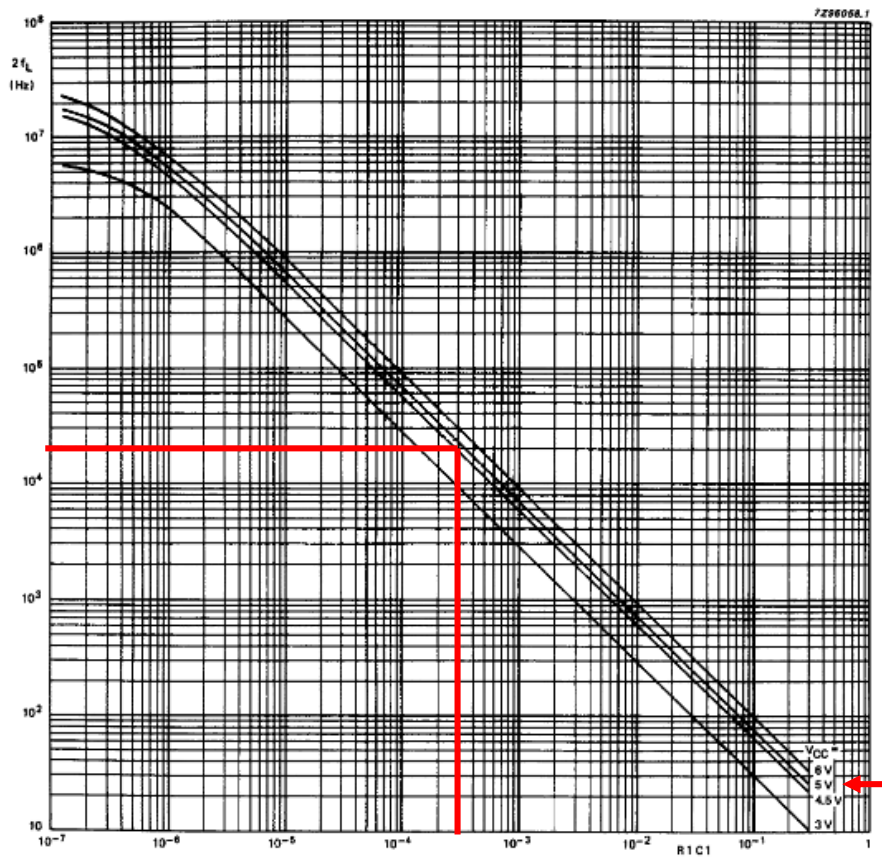
*Frecuencia central ( $f_{m\acute{a}x}$ ): 60 kHz*

*Tensión de entrada para  $f_{min}$ : 0.9 V*

*Tensión de entrada para  $f_{m\acute{a}x}$ : 4.1 V*

Obtenemos  $R_{10} * C_5$  de la gráfica XX.:

$$R_{10} * C_5 = 0.00035$$



**Gráfica 5.1. Relación la desviación típica y el producto entre R10 y C2 (fig.31 hoja de características 74HCT4046)**

Se debe calcular el término de offset para obtener los valores de las resistencias y del condensador:

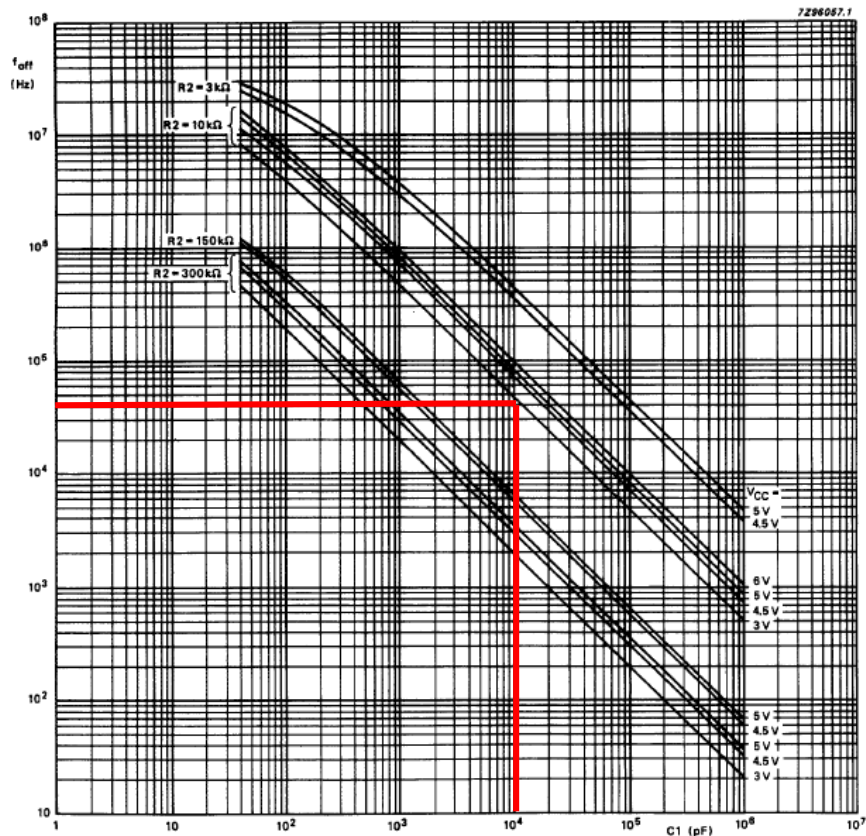
$$f_{off} = f_o - 1,6f_L = 50kHz - 1,6 * 10kHz = 34kHz$$

Con un offset de 34kHz se obtiene de la gráfica un valor de condensador C5 de 10nF y un valor de resistencia R11 de 22kΩ

Por tanto tenemos:

$$R10 = \frac{0.00035}{C2} = \frac{0.00035}{10nF} = 35k\Omega$$

En el diseño hemos instalado una R10 de un valor de 39 kΩ.



**Gráfica 5.2. Valor típico de offset (fig.31 hoja de características  
74HCT4046)**

Con el valor de los componentes resuelto se ha realizado una comprobación de los datos teóricos y prácticos de modulador.

Estos son los resultados que hemos obtenidos:

1. Datos teóricos:

INPUT PARAMETERS						
R1 [kΩ]	39		K2	7,18	Ron (k)	0,05
R2 [kΩ]	22		Vt	1,12	Is (mA)	5,00E-12
C1 [kΩ]	10000		Tp(ns)	11,73	I2 (mA)	1,42
			Cs (pF)	10011		



V TUNE [v]	k1	I1 (mA)	II (mA)	Vd	Vs1	Vs2	Vs	Fvco (kHz)
1,1	5,85	0,17	1,59	0,69	2,09	1,81	1,81	43,82
2,5	6,25	0,4	1,82	0,69	2,07	1,81	1,81	5,02E+01
3,9	6,82	0,68	2,11	0,70	2,04	1,82	1,82	57,83

OUTPUT PARAMETERS		
FREQ.MIN	43,825	[kHz]
FREQ.TYP	50,218	[kHz]
FREQ.MAX	57,834	[kHz]

Kvco	
5,00	kHz / V

**Tabla 5.1. Datos teóricos 74HCT4046 extraídos de [www.changpuak.com](http://www.changpuak.com)**

Si nos fijamos en los datos de “out parameters” según los datos teóricos tenemos una frecuencia central aproximada de 50 KhZ con una desviación típica de 20 kHz entre sus dos extremos.

2. Datos prácticos: para adquirir estos datos hemos utilizado los siguientes aparatos electrónicos de medida:
  - Voltímetro AMPROBE 37XR-A.
  - Osciloscopio SIGLENT SDS 1064CFL.
  - Fuente de alimentación Tti EL302Tv.

Se han realizado muestras experimentales de la señal de salida del modulador, Vsm, introduciendo una señal a través del osciloscopio de diferentes valores desde un valor mínimo de 0,8 V a un valor máximo de 4,8 V.

Si nos fijamos en los resultados experimentales que se muestran en la tabla 5.4 tenemos un valor de frecuencia de salida del modulador de 39,2 kHz para 0,9 V de entrada, un valor de frecuencia de 58,7 kHz para 4,1 V y un valor de frecuencia de 49,3 kHz para 2,5 V (frecuencia central).

Con estos valores consideramos que la etapa de modulación está bien construida para nuestro circuito.



N	Vin (V)	Fout (KHZ)	N	Vin (V)	Fout (KHZ)
1	0,8	39,2	1	2,8	51,2
2	0,9	39,2	2	2,9	51,8
3	1,0	43,2	3	3,0	52,3
4	1,1	43,6	4	3,1	52,8
5	1,2	44,0	5	3,2	53,4
6	1,3	44,4	6	3,3	53,9
7	1,4	44,8	7	3,4	54,4
8	1,5	45,3	8	3,5	55,0
9	1,6	45,7	9	3,6	55,6
10	1,7	46,1	10	3,7	56,2
11	1,8	46,6	11	3,8	56,8
12	1,9	47,0	12	3,9	57,3
13	2,0	47,4	13	4,0	58,1
14	2,1	47,9	14	4,1	58,7
15	2,2	48,4	15	4,2	59,4
16	2,3	48,8	16	4,3	60,2
17	2,4	49,3	17	4,4	60,9
18	2,5	49,3	18	4,5	61,7
19	2,6	50,3	19	4,6	62,9
20	2,7	50,8	20	4,8	79,7

**Tabla 5.2. Fout vs Vin**

A la salida del modulador obtendremos una señal cuadrada de pulsos con un extremo superior de valor 5 V y un extremo inferior de 0 V, figura 5.15.

Esta señal es la que usaremos posteriormente en el driver de potencia para la conmutación de los LEDs.

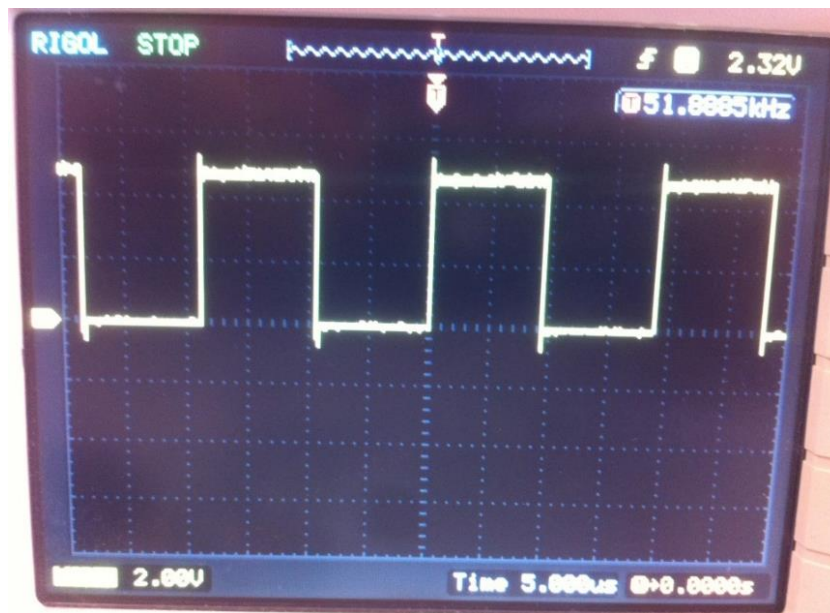


Figura 5.15. Señal de salida del modulador,  $V_{sm}$

### 5.3. Etapa de potencia o driver

Se ha diseñado una etapa de potencia [1] [2] [4] para controlar los diferentes niveles de la señal cuadrada obtenida del modulador.

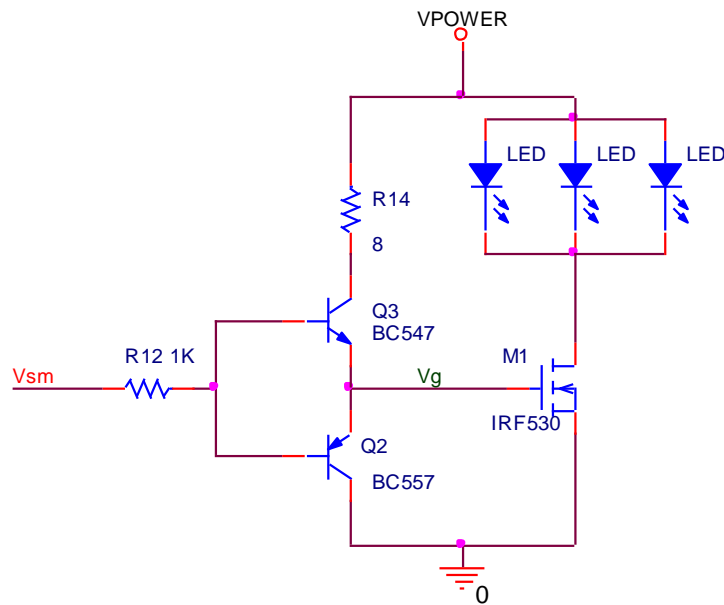
Para ello hemos utilizado dos transistores de unión bipolar, BJT, el BC547 de unión NPN y un 557 con unión PNP.

La unión entre los BJT es una conexión emisor-colector de manera que cuando uno de los transistores este conduciendo para 5 V de salida del modulador, el otro se encuentre en circuito abierto. De manera contraria para 0 V de salida del modulador, el BJT en circuito abierto ahora conduce y el otro pasa a ser un circuito abierto.

Se ha instalado un transistor MOSFET para el control de la intensidad a la que están sometidos los LEDs.

Los LEDs conmutarán según sea la entrada de tensión al driver y con el control de los BJT sobre la tensión del MOSFET.

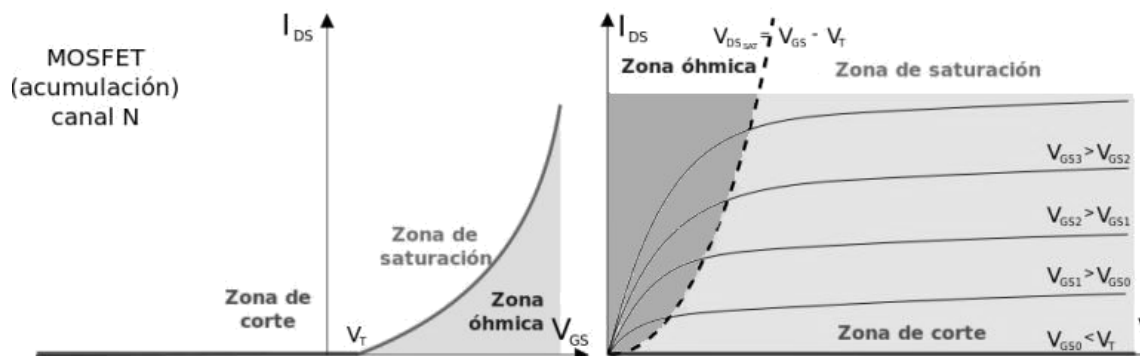
Podemos observar el diseño en la figura 5.16.



**Figura 5.16. Etapa de potencia / Driver**

La etapa de potencia tiene un funcionamiento PWM (todo o nada) de manera que tendremos trabajando al MOSFET IRF530 en un modo de saturación. Para conseguir esto debemos tener una tensión de entrada al MOSFET, mayor a un valor determinado de  $V_{gs}$ . Este valor será mayor de 4V para que el MOSFET siempre conduzca.

A parte tenemos que tener en cuenta que no podemos suministrar a la puerta del MOSFET una tensión mayor de 20 V (ver anexo 12.3), valor máximo para una tensión  $V_{gs}$ .

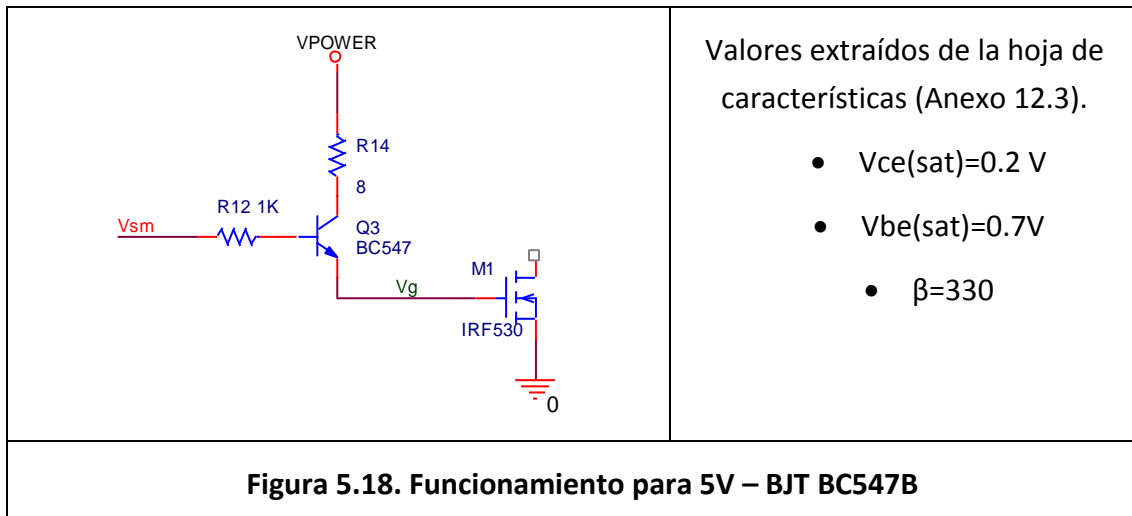


**Figura 5.17. Funcionamiento del MOSFET**

En primer lugar se muestran los cálculos realizados para las cargas resistivas de la etapa de potencia, así como la corriente que circulará por los BJT.



Para un valor de 5V de  $V_{sm}$ , conducirá el BJT BC547.



$$5V = I_B * R_{12} + V_{BE(sat)} + V_{g1(sat)}$$

$$5V = I_B * R_{12} + 0.7V + 4V$$

$$I_B * R_{12} = 5V - 0.7V - 4V = 0.3$$

$$V_{power} = I_C * R_{14} + V_{CE(sat)} + V_{g1(sat)}$$

$$6.5V = I_C * R_{14} + 0.2V + 4V$$

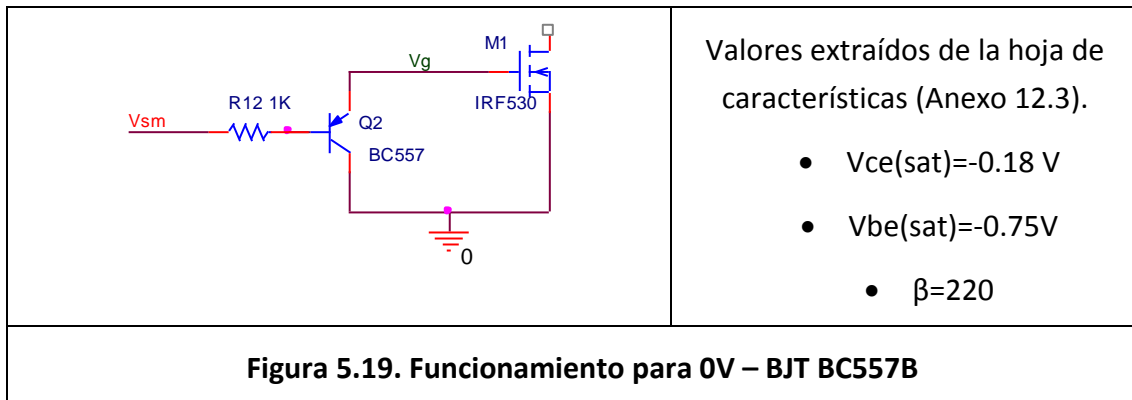
$$I_C * R_{14} = 5V - 0.2V - 4V = 2.3V$$

$$\text{Condición de saturación: } I_C > \beta * I_B$$

$$\text{Como } R_{12} = 1k\Omega \rightarrow I_B = \frac{0.3}{1000} = 0.3 \text{ mA}$$

$$I_B * \beta * R_{14} = 0.8 \rightarrow R_{14} = \frac{2.3V}{0.3 \text{ mA} * 330} = 23,23 \Omega$$

Para un valor de 0V de  $V_{sm}$ , conducirá el BJT BC557.



El funcionamiento del driver es muy sencillo. Necesitamos una tensión, como mencionamos anteriormente, para que el MOSFET conmute. Cuando la entrada este en el nivel alto de la señal cuadrada, es decir, una señal de valor de 5V, el BJT547B dejará pasar la tensión para que el MOSFET conmute y por tanto los LEDs estarán encendidos

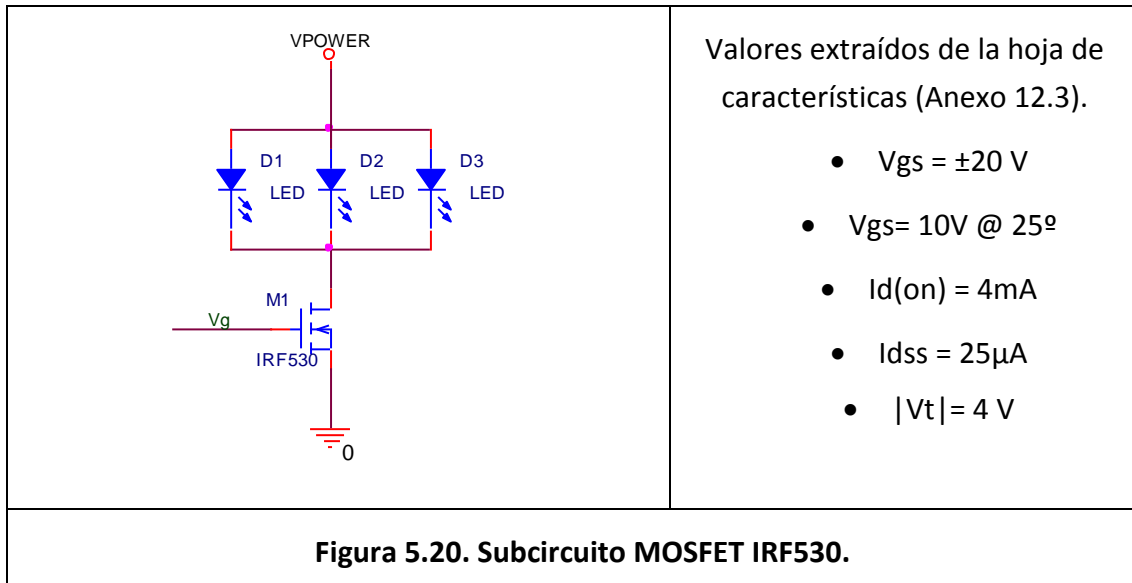
Por otro lado cuando la entrada este en el nivel bajo de la señal cuadrada, es decir, una señal de valor de 0V, el BJT557B, dejará pasar la tensión para que el MOSFET conduzca. Como esta señal de tensión es menor a la tensión de puerta necesaria, el MOSFET no conmutara y por tanto los LEDs estarán apagados

El condensador interno del MOSFET se cargará cuando la tensión que le aplicamos a la puerta supere al valor de puerta establecido para la conducción del transistor. Cuando el BJT BC557 comience a conducir y por tanto la tensión aplicada sea menor a la tensión de puerta, el condensador interno comenzará a descargarse.

Una mejora que se le puede aplicar al diseño es colocar un condensador o antes de la puerta del MOSFET o antes del colector del BJT BC547, de forma que la descarga sea mucho más lenta y por tanto tengamos un tiempo de conmutación mayor.

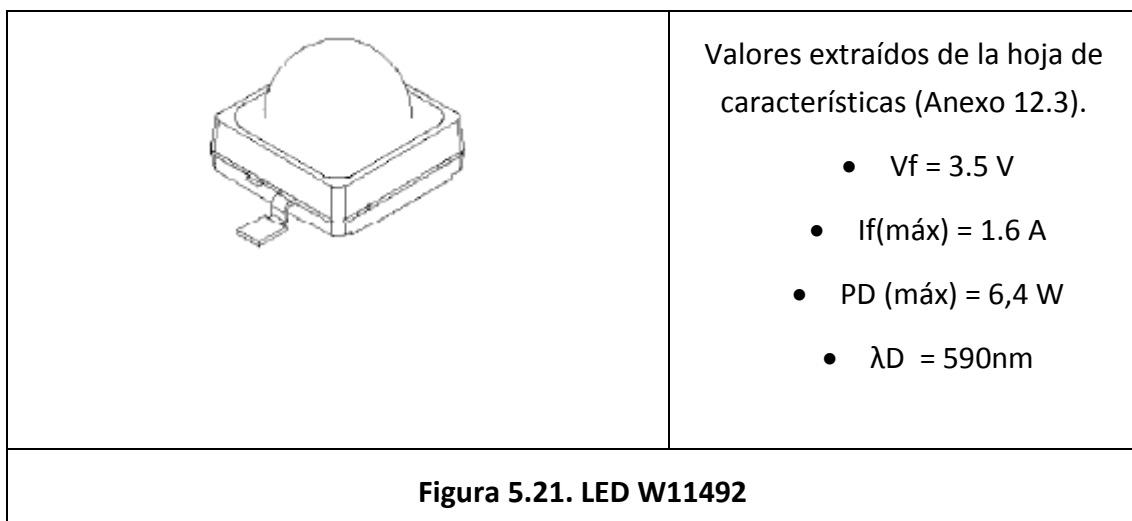
Una vez conocido el funcionamiento de cada BJT y los valores que llegan en cada caso al MOSFET, debemos calcular la intensidad que suministraremos a los LED de potencia.

El principal objetivo para el MOSFET es que funcione como un interruptor, de manera que encienda y apague los LEDs al conmutar. Para este tipo de funcionamiento y, como ya hemos dicho antes, es necesario que nuestro MOSFET trabaje en zona de saturación.



En la figura 4.3.5 podemos observar el sub-circuito con el MOSFET IRF530 que usaremos para encender y apagar la línea de LEDs.

En la figura 4.3.6 podemos observar las características del LED W11492 que usaremos para emitir la luz visible con la información.



Para que los LEDs funcionen se necesita una corriente máxima de 1.6 A según la hoja de características. Nuestro driver puede conmutar, según se aprecia en la fuente de alimentación (figura 5.22) con una corriente de un 50%, es decir de 0.8 A.



**Figura 5.22. Alimentación del driver y LEDs**

En un principio se pensaría que es necesaria la suma de una corriente de 1,6A, valor entregado por la fuente. Pero al tener los LEDs en una posición en paralelo, formando un bloque de LEDs, solo se necesita 0.8 A en total.

$$V_{power} = V_{LED} + V_{DS} \rightarrow V_{DS} = 6.5V - 3.5V = 3V$$

Comprobamos que funciona correctamente en la zona de saturación:

$$V_{DS} \geq V_G - V_t = 5V - 4V = 1V$$

No será necesario colocar una resistencia entre la fuente y la tierra ya que con la tensión de entrada conseguimos que el MOSFET funcione en saturación y por tanto los LEDs reciban la corriente necesaria para su conmutación.

$$P_{LED} = I_{LED} * S = 0.8 A * 0.3 \frac{W}{A} = 0.24 W$$

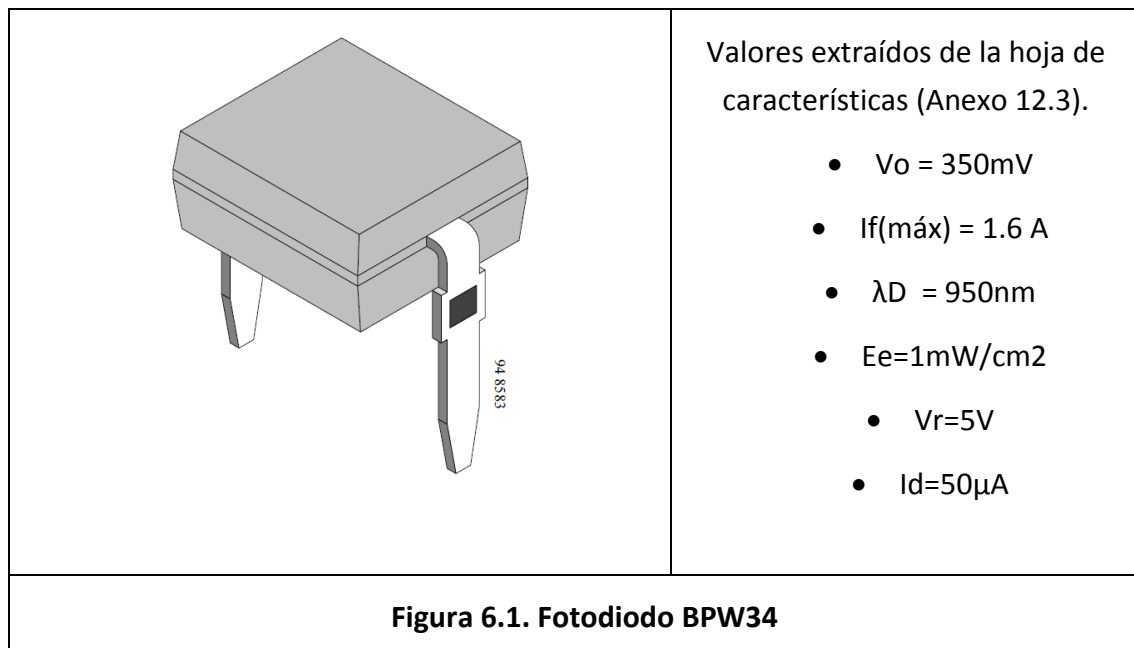
## 6. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA RECEPTOR

### 6.1. Etapa de acondicionamiento

#### 6.1.1. Convertidor I-V

Se ha diseñado un convertidor de intensidad a tensión [1] [2] [4]. La señal que obtenemos del fotodiodo, es una señal de intensidad que deberemos convertir en una señal de tensión, amplificar y tratar para que sea adecuada para nuestro demodulador de señal.

Para la captación de la potencia luminosa hemos utilizado el fotodiodo BPW34, por su bajo coste, su alta velocidad de funcionamiento y su alta fotosensibilidad. SE encargará de recoger la potencia luminosa suministrada por los LEDs y transformarla en una señal de corriente. En la figura 6.1 podemos observar las características principales de este fotodiodo.

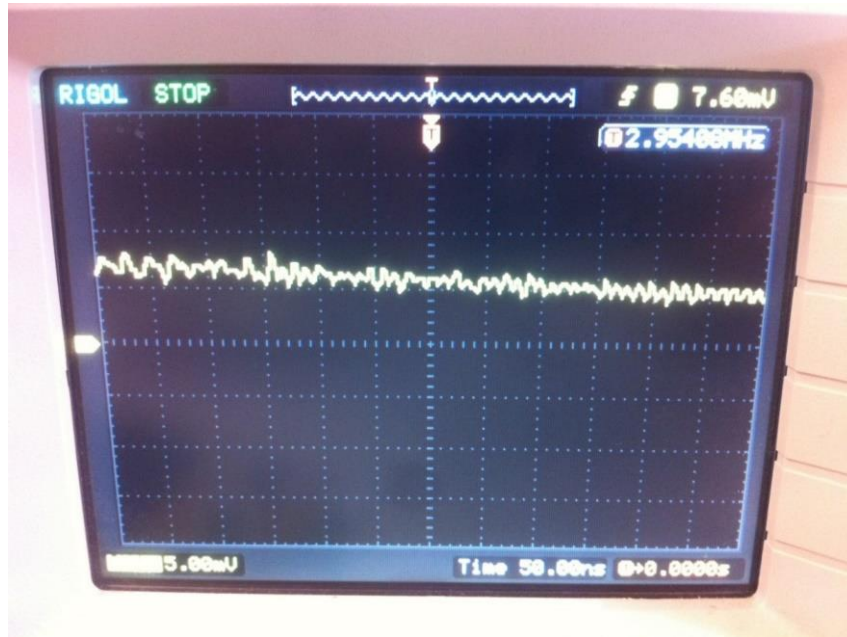


El sistema de captación viene dado por las características del fotodiodo que vaya a ser utilizado. Según la hoja de características del fotodiodo con una longitud de onda de 950nm, su sensibilidad está entorno a unos 0,97 A/W.

$$I_{FD} = S_{FD} * P = 0.97 \text{ A/W} * P$$

El fotodiodo está alimentado por un valor de tensión de 5V. Con una irradiancia de  $1\text{mW/cm}^2$ , tenemos una corriente de  $1\mu\text{A}$ . Este sería el caso de un funcionamiento correcto, pero esto dependerá a la distancia que se encuentre el fotodiodo del LED. La distancia adecuada con una captura efectiva de la señal es de 1,20 m.

Podemos observar la señal de tensión que hemos obtenido del fotodiodo en la figura 6.2. Esta señal es de un voltaje muy pequeño, ya que el fotodiodo lo que nos proporcionará es una señal de intensidad.



**Figura 6.2. Señal de salida Fotodiodo**

Se ha diseñado un convertido de corriente a tensión para poder tratar la intensidad procedente del fotodiodo.

Para este diseño hemos utilizado un amplificador operacional, MC34071, realimentado negativamente.

Según el montaje para una distancia entre 1m y 1,5m, para una salida máxima de 5V, la corriente máxima de entrada al amplificador será:

$$I_D = \frac{5V}{330\text{ k}\Omega} = 15\mu\text{A}$$

Hoja de catálogo (anexo 12.3), gráfica "Reverse light current vs irradiance"

$$\text{Para } 15\mu\text{A} \rightarrow E_e = 0.3\text{ mW/cm}^2$$

Hoja de catálogo (anexo 12.3), gráfica “Reserve light current vs illuminance”

$$\text{Para } 15\mu A \rightarrow E_e = 200lx$$

En la realimentación se ha incorporado un condensador que es necesario para mantener la estabilidad. Este condensador compensa la capacidad del fotodiodo en la entrada no inversora.

El condensador de realimentación en combinación con la resistencia forma un polo en la respuesta del amplificador.

Para el cálculo de este condensador se limita el ancho de banda del sistema a 100kHz. De esta forma se obtiene un valor de condensadores de:

$$C_1 = \frac{1}{2 * \pi * R_1 * f_p} = \frac{1}{2 * \pi * 330k\Omega * 100kHz} = 4.8pF$$

Como no se disponía de un condensador de este valor se han dispuesto 3 en serie de 15pF dando una capacidad de 5pF. Si recalculamos la frecuencia del polo:

$$f_p = \frac{1}{2 * \pi * R_1 * C_1} = \frac{1}{2 * \pi * 330k\Omega * 4.8pF} = 100,5 kHz$$

Después de haber calculado el valor máximo del condensador de realimentación, es necesario calcular el ancho de banda de ganancia del amplificador operacional para que el circuito sea estable.

Según la hoja de características:

$$F_{BW} = 4.5 MHz; \text{ Differential input capacitance, } C_{IN} = 7,5 pF$$

En la entrada inversora del operacional tenemos una capacidad que es la suma entre la capacidad interna del fotodiodo y la capacidad diferencial del operacional.

$$C_{IN1} = C_{IN} + C_j = 725pF$$

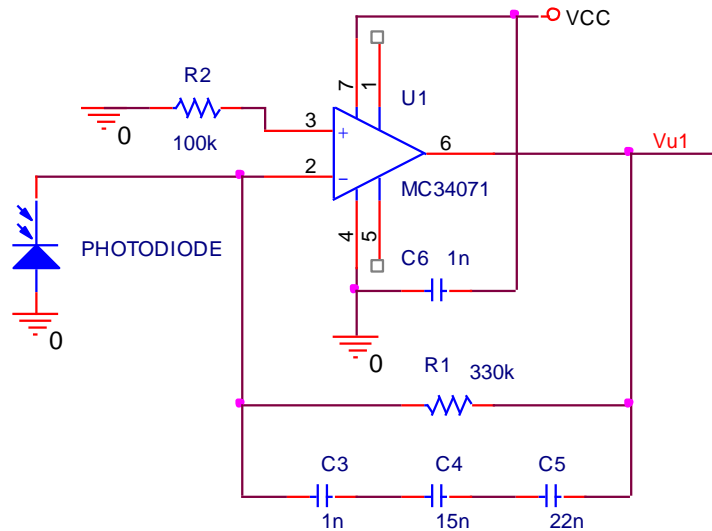
Esta capacidad en la entrada inversora del operacional genera un cero:

$$f_z = \frac{1}{2 * \pi * R_1 * (C_1 + C_{IN1})} = 6237Hz$$

Para garantizar la estabilidad se tiene que cumplir que:

$$f_1 > f_p \rightarrow f_1 = \frac{C_1}{C_1 + C_{wt}} * F_{BW} = 290322 Hz \simeq 290 kHz$$

Podemos observar el circuito diseñado en la figura 6.3:



**Figura 6.3. Esquema convertidor I-V**

Podemos observar en la figura 6.4 la señal a la salida del inversor. Esta señal tendrá un valor máximo 2Vpp.



**Figura 6.4. Señal después del convertidor**



### 6.1.2. Filtro Paso-Alto con diodo

Se ha instalado un filtro paso-alto a la salida del inversor para la atenuación de las componentes de baja frecuencia donde la salida será la caída de tensión de la resistencia R3 que lo compone.

$$V'_{U1} = V_{U1} * \frac{\omega * R_3 * C_7}{\sqrt{1 + \omega^2 * R_3^2 * C_7^2}} = V_{U1} * \frac{2\pi * 1k\Omega * 1nF}{\sqrt{1 + 2\pi * (1k\Omega)^2 * (100nF)^2}}$$

$$= V_{U1} * 6,29 * 10^{-4}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi * R_3 * C_7} = \frac{1}{2\pi * 1k\Omega * 100nF} = 1,6 \text{ kHz}$$

A parte se ha incluido al filtro paso-alto un diodo [1] [3], D1DL42A, para poder eliminar las componentes externas al circuito que nos puedan ocasionar un problema en el manejo de la señal y, por tanto, de la información que estamos transportando.

Los valores del diodo vienen dados por la siguiente fórmula:

$$V_T = \frac{K}{q} * T = \frac{1,38 * 10^{-23}}{1,6 * 10^{-19}} * (25 + 273) = 271 \text{ mV}$$

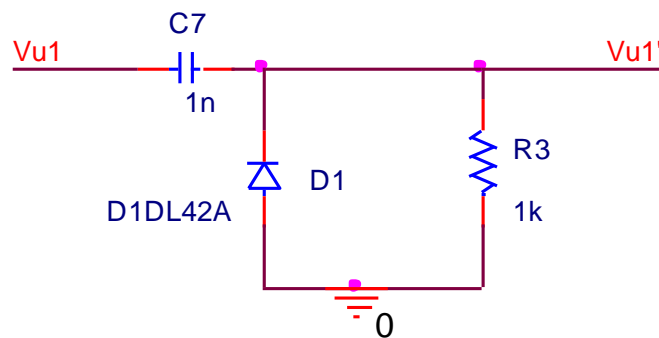


Figura 6.5. Filtro Paso-Alto con diodo

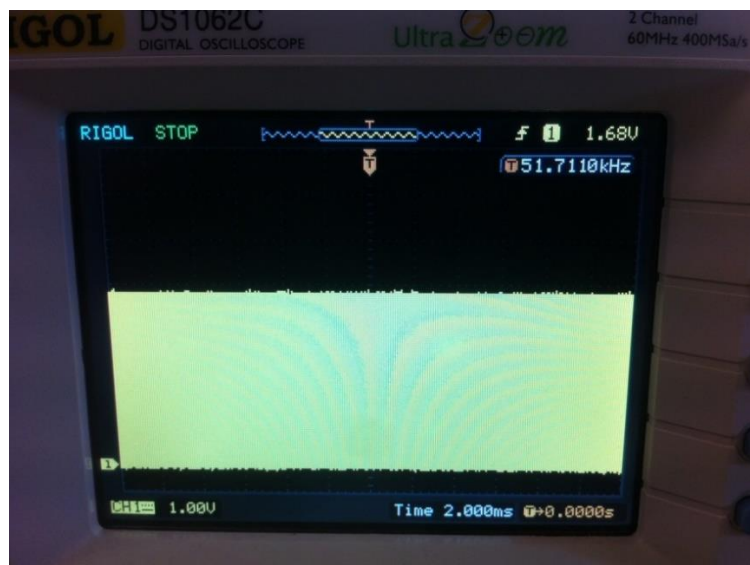
El resultado del efecto del diodo podemos apreciarlo en las figuras 6.6 y 6.7.

En la figura 6.6 se puede observar una pequeña ondulación de la señal debido a las componentes externas que transporta la señal luminosa. Este filtro elimina la componente continua que introduce, al sistema, la luz solar y las componentes de baja frecuencia que introducen al sistema otro tipo de fuentes como los fluorescentes de 100 Hz que es lo que se puede apreciar en la figura 6.6.



**Figura 6.6. Señal antes del filtro.**

En la figura 6.7 se puede observar la señal anterior con la componente externa eliminada. Nos queda una señal totalmente proporcional sin ninguna desproporción en su amplitud.



**Figura 6.7. Señal después del filtro.**

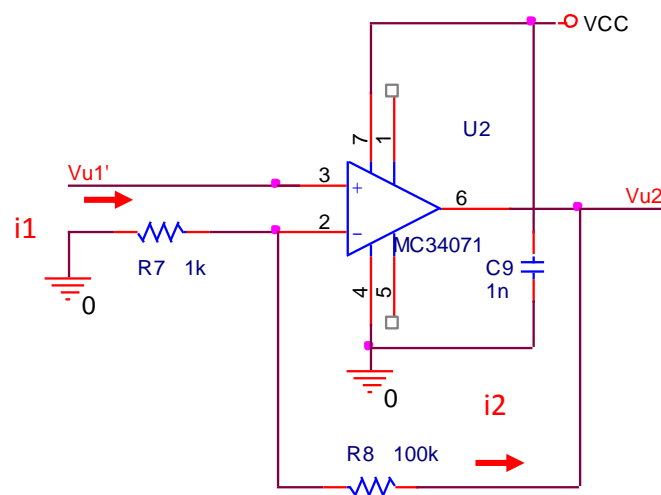
### 6.1.3. Amplificador Inversor

Una vez se tiene la señal filtrada y tratada para no transportar componentes innecesarios, deberá ser amplificada y tratada para obtener una señal adecuada que pueda ser desmodulada.

En primero lugar se ha amplificado la señal. Para ello hemos diseñado un amplificador con realimentación inversora [1] [3]. Se ha utilizado un amplificador operacional, MC34071, y dos resistencias para el puente de realimentación.

A parte se ha instalado como en los anteriores casos un condensador de acoplo para el mejor funcionamiento del amplificador operacional.

En la figura 6.8 se puede observar el circuito implementado la dirección de las corrientes que circulan por él.



**Figura 6.8. Amplificador Inversor**

El amplificador Inversor lo que hace básicamente es introducirle una ganancia a la tensión de entrada de manera que tengamos la misma señal pero amplificada. Este hecho lo podemos observar en las siguientes ecuaciones:

$$I_1 = I_2 \rightarrow \frac{0V - V^-}{R_7} = \frac{V^- - V_{U2}}{R_8}; \text{siendo } V'_{U1} = V^+ \simeq V^-$$

$$V_{U2} = V'_{U1} \left( 1 + \frac{R_8}{R_7} \right) = \left( 1 + \frac{100k\Omega}{1k\Omega} \right) = V'_{U1} * 101$$

$$\text{donde la ganancia es } A = \frac{V_{U2}}{V'_{U1}} = \left( 1 + \frac{R_8}{R_7} \right) = 101$$

En la figura 6.9 se puede observar la señal que vamos a tener a la salida del amplificador.

Esta señal ya filtrada y amplificada se deberá convertir en una señal cuadrada para nuestro demodulador.

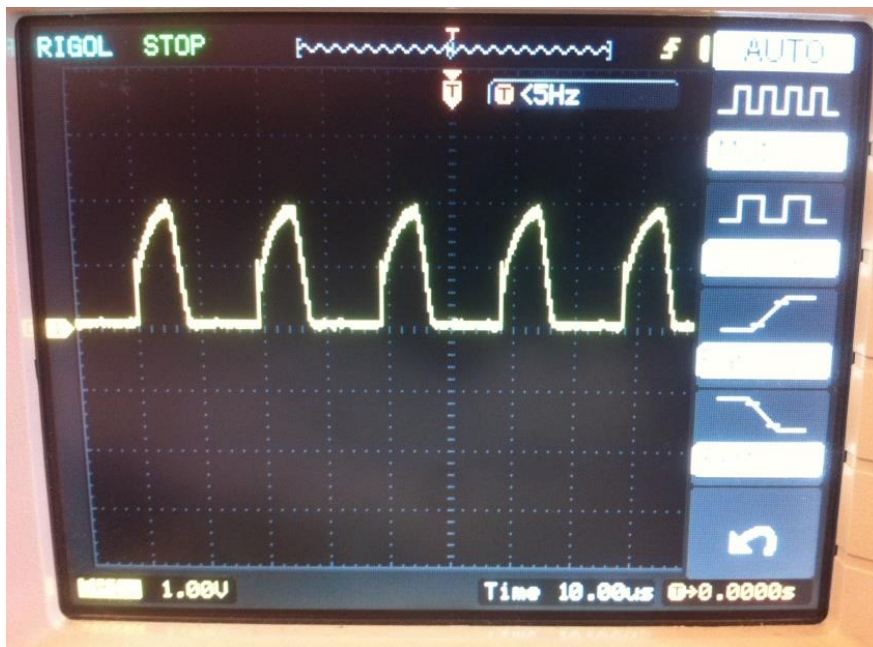


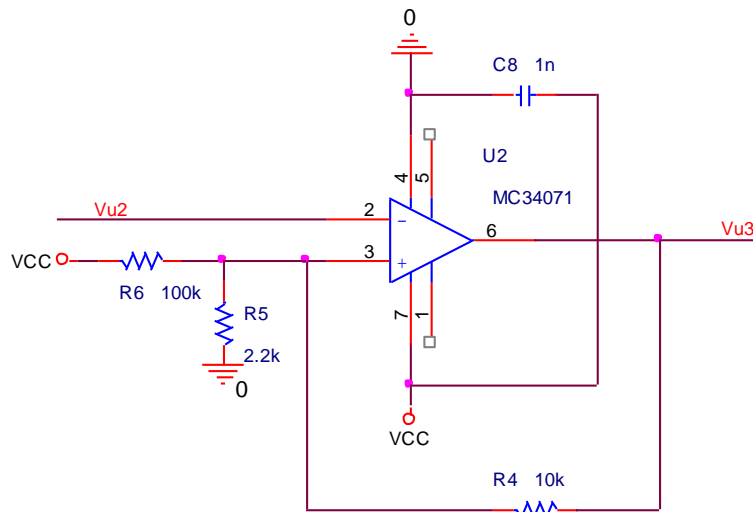
Figura 6.9. Señal después del inversor

#### 6.1.4. Comparador con histéresis

En el emisor teníamos una señal sinusoidal que gracias al modulador la convertíamos en un tren de pulsos con el que hacíamos conmutar los BJT.

Con el demodulador trataremos de recuperar esa señal y para ello necesitamos una señal cuadrada (tren de pulsos) que podamos desmodular, es decir, invertir el proceso del emisor.

Para conseguir esta señal se ha diseñado un comparador basado en histéresis. Este convertirá nuestra señal sinusoidal en la señal cuadrada.



**Figura 6.10. Comparador con histéresis**

El comparador por histéresis cuando se alcanza un rango superior en la entrada, la señal de salida es continua en ese rango hasta que la señal alcanza un rango inferior en la entrada, que la señal de salida cambiará a otro rango. En nuestro circuito queremos tener un rango superior de salida de 4V y un rango inferior de 0V, por lo que:

$$\text{Si } V^+ > V_{U2} \rightarrow V_{U3} = 5V$$

$$\text{Si } V^+ < V_{U2} \rightarrow V_{U3} = 0V$$

$$\frac{V_{cc} - V^+}{R_6} = \frac{V^+}{R_5} + \frac{V^+ - V_{U3}}{R_4}$$

$$\frac{V_{cc}}{R_6} - \frac{V^+}{R_6} = \frac{V^+}{R_5} + \frac{V^+}{R_4} - \frac{V_{U3}}{R_4}$$

$$V^+ * \left( \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_6} \right) = \frac{V_{cc}}{R_6} + \frac{V_{U3}}{R_4}$$

$$\text{Si } V^+ > V_{U2} \rightarrow V_{U3} = 5V \rightarrow V^+ = 0.95 V$$

$$\text{Si } V^+ < V_{U2} \rightarrow V_{U3} = 0V \rightarrow V^+ = 0.09 V$$

Para conseguir un valor adecuado, en el diseño original se instaló un potenciómetro multi-vuelta de 100kΩ, con el que podremos “jugar” para alcanzar la señal adecuada a nuestro parecer.

En la figura 6.11 se puede observar la señal que vamos a tener a la salida del comparador con histéresis.

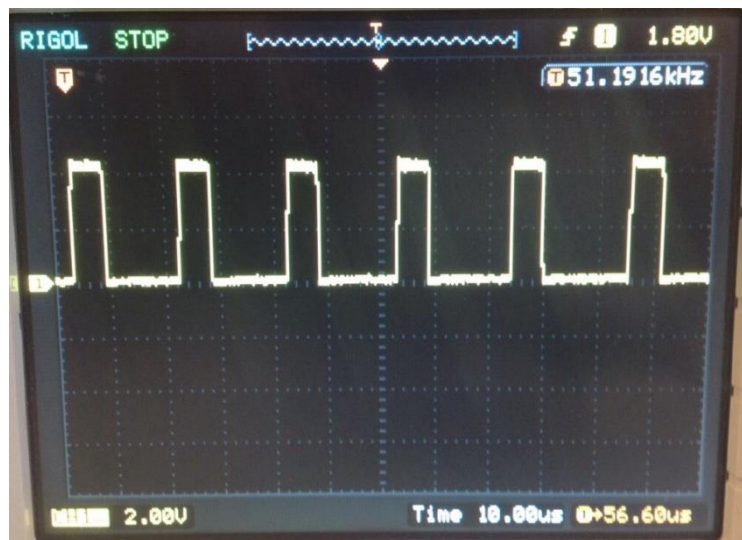


Figura 6.11. Señal después del comparador

## 6.2. Etapa demoduladora

Se ha diseñado un circuito de demodulación con un semiconductor 74HCT4046, con una configuración VCO. El demodulador está alimentado por una un valor de tensión de 5V.

El demodulador se encargará de hacer el proceso inverso al modulador de la etapa emisora. Convertiremos la señal cuadrada que hemos obtenido del comparador en una señal sinusoidal de 0,9V a 4,1V.

Nuestra señal cuadrada de entrada como la señal de entrada en el emisor, tiene una frecuencia central de 50kHz.

Para el diseño del demodulador hemos tomado el diseño especificado en la hoja de características (Figura 6.12).

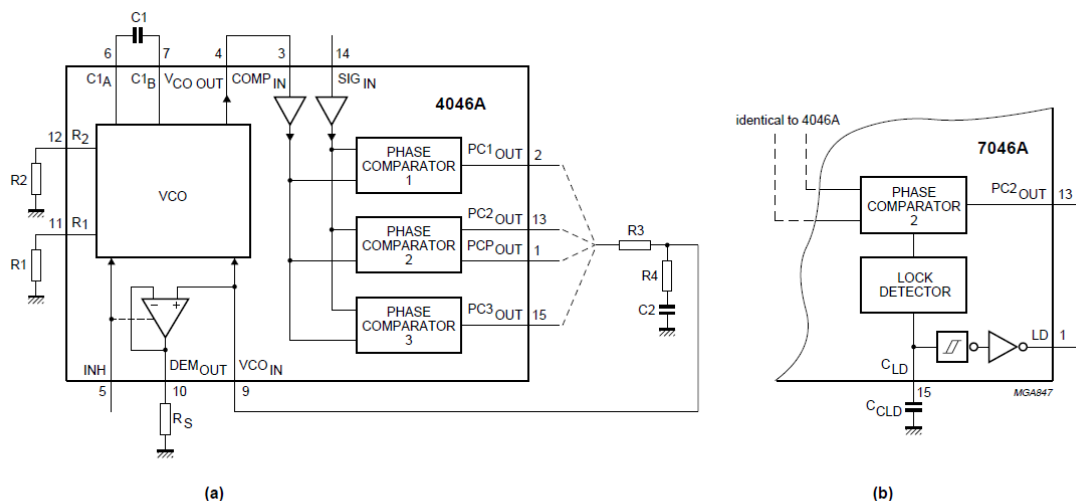


Fig.4 Functional diagram.

**Figura 6.12. Esquema de montaje 74HCT4046**

En la figura 6.13 se puede observar el diseño implementado en Orcad del esquema anterior.

Para las resistencias R10 y R11 y el condensador C10 se ha realizado el mismo estudio que con el modulador del emisor.

$$3k\Omega < R_{11} \text{ Y } R_{10} < 300k\Omega$$

$$R_{11} || R_{10} = \frac{39k * 15k}{39k + 15k} = 10.93k\Omega > 2,7k\Omega$$

$$100nF < C_{10} < 40pF$$

Por otro lado se deberán tomar las especificaciones necesarias para el resto de componentes del diseño según la hoja de características.

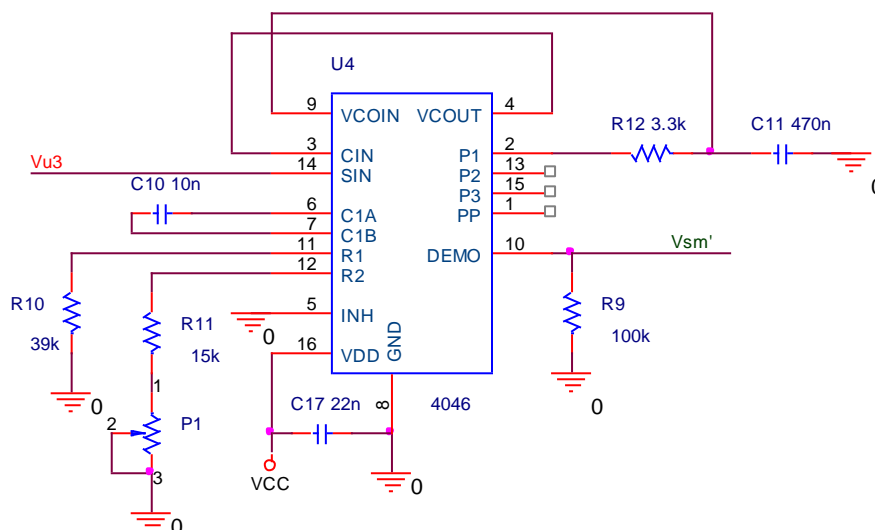
$$R_{12} = 3.3k\Omega < 300k\Omega$$

Para las resistencias R10 y R11 y el condensador C10 se ha realizado el mismo estudio que con el modulador

La resistencia R9 es de un valor de 100kΩ, ya que:

$$\text{Para } 3V < V_{cc} < 6V \rightarrow 50k\Omega < R_9 < 300k\Omega \rightarrow R_9 = 100k\Omega$$

Se ha colocado un potenciómetro multi-vuelta de 10kΩ para darle más resistividad a la 11 y así conseguir una frecuencia foff más aproximada al valor que se busca. Este potenciómetro nos ayuda a ajustar la frecuencia de corte del modulador para que coincida con la del emisor, esto es porque la tolerancia de los componentes, aunque sean del mismo valor, hace que existan diferencias.



**Figura 6.13. Demodulador**



En la figura 6.14 se puede observar la señal de salida obtenida del demodulador.

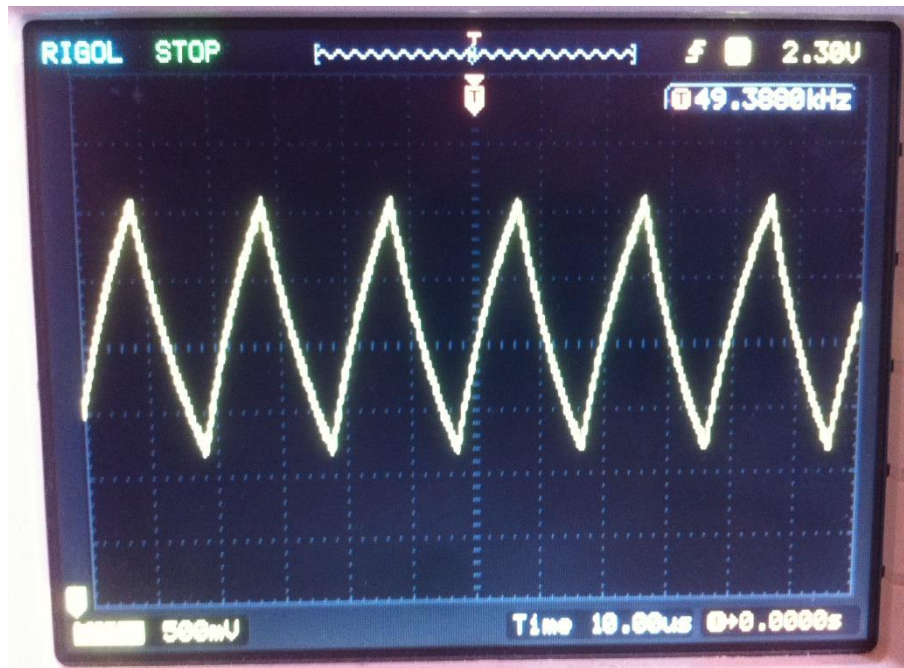


Figura 5.14. Señal después demodulador

## 6.3. Etapa amplificadora

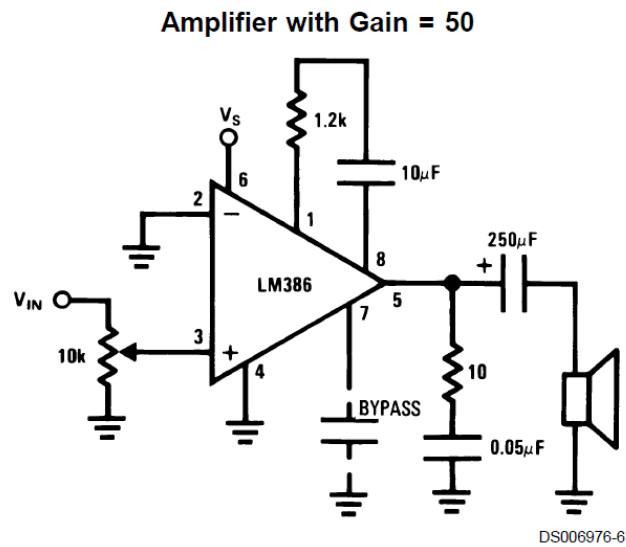
### 6.3.1. Amplificador de Audio

Se ha diseñado un sistema de amplificación de audio con un LM386 [13], según las hojas de características del fabricante del componente. Es un amplificador que se usa para bajas tensiones en aplicaciones de consumo.

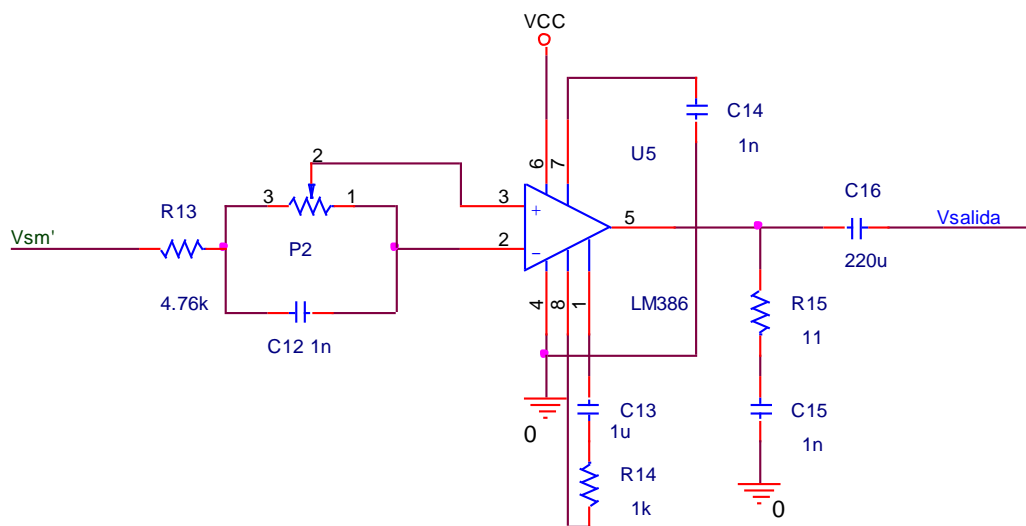
Para una mayor amplificación se ha tomado como ejemplo el montaje del amplificador de con una ganancia de valor 50. Este montaje lleva una ganancia que la obtenemos de una resistencia y un condensador en los pines 1 y 8.

Tenemos un potenciómetro de 10k $\Omega$  a la entrada positiva del operacional al que le hemos incluido una resistencia de 4,76k $\Omega$  y un condensador en paralelo para la entrada negativa. Este filtro es un filtro Paso-Bajo que se usa para eliminar la frecuencia de la señal portadora, por lo que su valor estará ajustado para permitir el paso de las frecuencias audibles.

En la figura 6.15 podemos observar el esquema proporcionado por el fabricante, y en la figura 6.16 el montaje realizado.



**Figura 6.15. Amplificador de Audio**



**Figura 6.16. Amplificador de Audio**

Como se puede apreciar en la figura 6.17, se ha conseguido una señal similar a la señal que teníamos a la entrada del emisor. Este resultado nos dice que transmisión ha sido buena y el diseño es correcto.

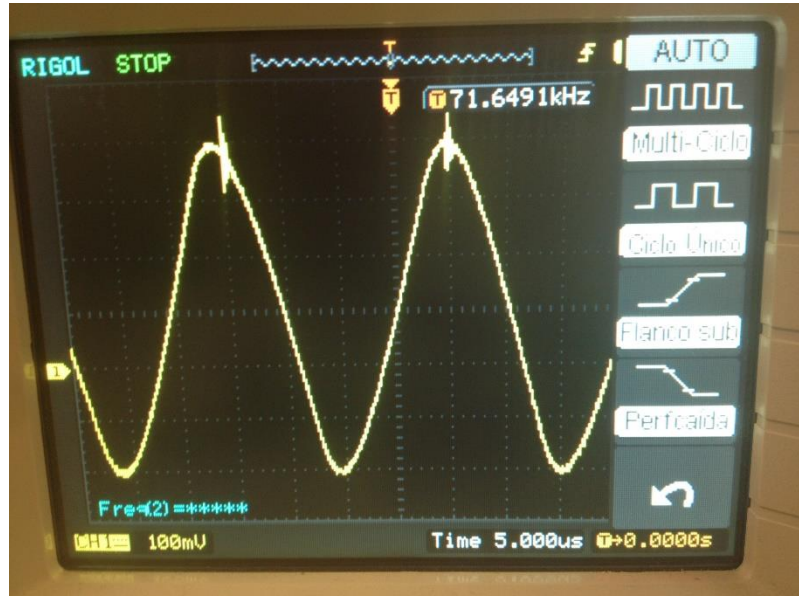


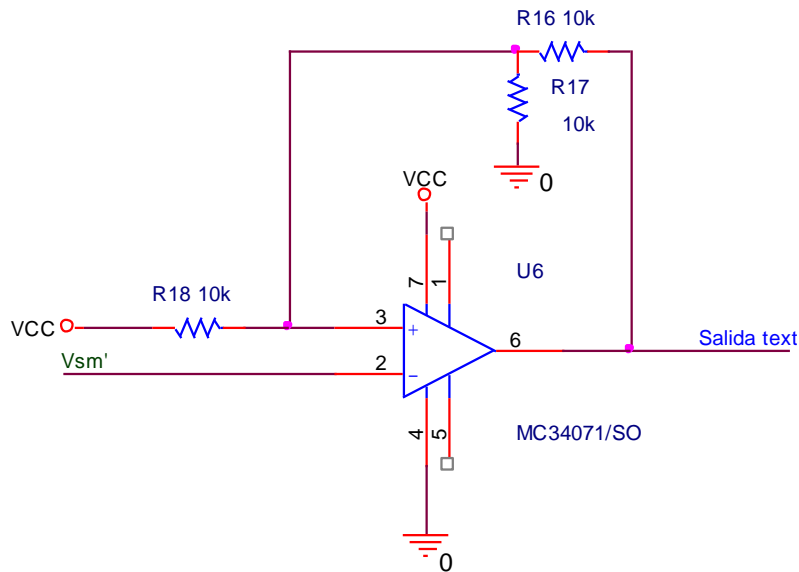
Figura 6.17. Señal de salida final para audio

### 6.3.2. Comparador con histéresis para texto

Ya que la señal que obtenemos del modulador es una señal sinusoidal, se necesitará transformarla en una señal cuadrada de pulsos para su utilización en un dispositivo digital como puede ser un PC o una Tablet.

Para conseguir esto se ha diseñado un comparador con histéresis.

El funcionamiento de este diseño es similar al comparador del acondicionamiento que se tenía en el montaje del emisor.



**Figura 6.18. Comparador con histéresis para texto**

El funcionamiento del comparador viene dado por las siguientes ecuaciones:

$$\text{Si } V^+ > V'_{sm} \rightarrow V_{salida} = 5V$$

$$\text{Si } V^+ < V'_{sm} \rightarrow V_{salida} = 0V$$

$$R_{18} = R_{17} = R_{16} = R$$

$$\frac{V_{cc} - V^+}{R} = \frac{V^+}{R} + \frac{V^+ - V_{salida}}{R}$$

$$V_{cc} - V^+ = V^+ + V^+ - V_{salida}$$

$$V^+ = \frac{V_{cc} + V_{salida}}{3}$$

$$\text{Si } V^+ > V'_{sm} \rightarrow V_{salida} = 5V \rightarrow V^+ = 3.33 V$$

$$\text{Si } V^+ < V'_{sm} \rightarrow V_{salida} = 0V \rightarrow V^+ = 1.66 V$$

Como se puede apreciar en la figura 6.19, se ha conseguido una señal similar a la señal que teníamos a la entrada del emisor. Este resultado nos dice que transmisión ha sido buena y el diseño es correcto.

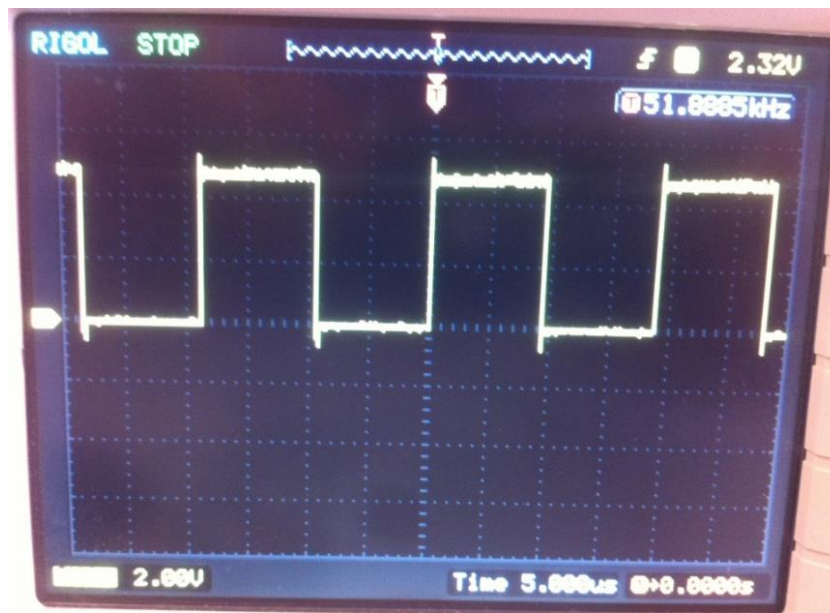


Figura 6.19. Señal de salida final para texto

## 6.4. IOIO OTG para Android

Para transmitir nuestra señal con la información del receptor a nuestro dispositivo hemos utilizado una tarjeta de desarrollo Android por USB, IOIO OTG [12] [14]

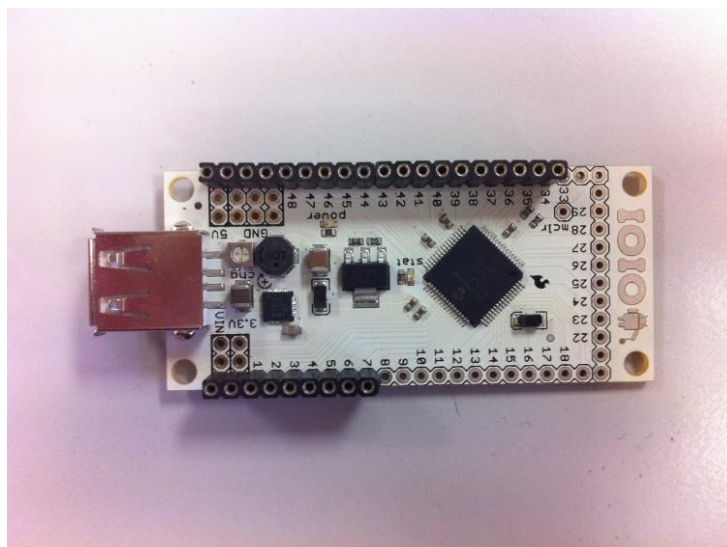


Figura 6.20. IOIO OTG

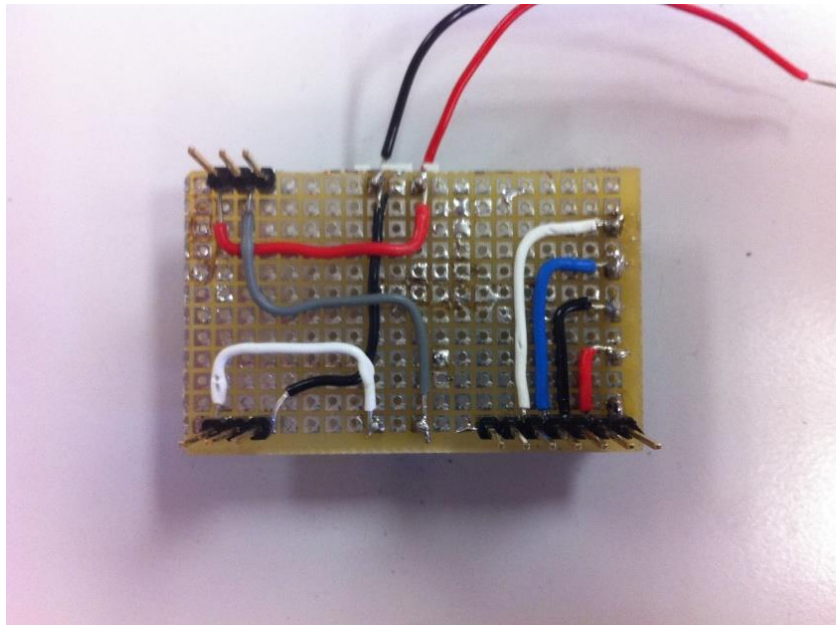
El IOIO puede funcionar como una entrada o salida digital, dependiendo de la elección que hagamos del software.

En este caso lo usaremos como para un voltaje de 5V. Primero se deberá seleccionar el pin tolerante de 5V. Si se intentará aplicar el pin no tolerante de 5V, nos arriesgaríamos a dañar de manera permanente la tarjeta.

Se requerirá una operación de “colector abierto:

- Un nivel lógico BAJO hará que el pin fuerce una tensión de 0 V ( " tierra") en lo que se conecta a la misma.
- Un nivel lógico ALTO hará que el pin no fuerce nada en todo lo que se conecta a él, como si estuviera físicamente desconectado.

Para realizar las conexiones del receptor y la alimentación al IOIO hemos añadido una pequeña placa cableada con pines para sus diferentes montajes y usos (Figura 6.21).



**Figura 6.21. Placa de conexión y alimentación para el IOIO**

## 7. ALIMENTACIÓN DE LOS CIRCUITOS

Para la alimentación de nuestros circuitos se ha diseñado un pequeño circuito [5] que convertirá la tensión que nos proporciona una pila de 9V en la tensión de 5V necesaria para el diseño.

Los reguladores de tensión LM78XX tiene un rango de salida de tensión entre 5V y 24V. Se ha escogido el regulador de tensión LM7805 ya que nos proporciona salidas de tensión entre un valor mínimo de 4.8V y un valor máximo de 5.2V.

El fabricante nos da un montaje para nuestro diseño (figura 7.1):

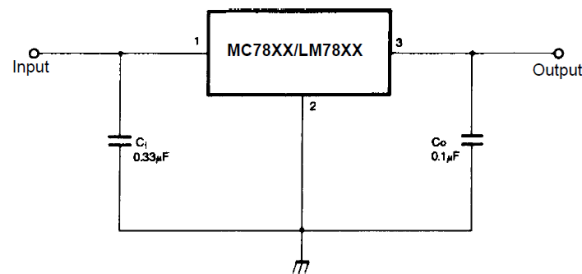


Figure 5. DC Parameters

Figura 7.1. Esquema de montaje LM7805

Para nuestro diseño hemos utilizado los dos condensadores de desacoplo estipulados en la hoja de características. Estos condensadores son efectivos para el control de ruido en las fuentes de alimentación porque tienen una ESR bajo.

Dependiendo del nivel de alta tensión del circuito se elegirá un condensador u otro.

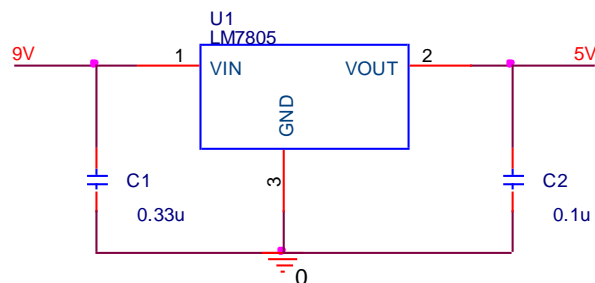


Figura 7.2. Fuente de alimentación LM7805



Para la alimentación de driver de potencia es necesaria una alimentación de unos 6,5 V de tensión.

Para un sistema emisor portátil sería necesario diseñar un circuito que nos proporcionara está tensión. El LM7806 sería una buena opción de uso. Este regulador nos transforma una tensión de 9V de entrada en una tensión de 6V de salida. Aunque en principio se esté alimentando nuestro driver con 6,5V, el diseño del driver permite el funcionamiento correcto entre unos valores de alimentación de 4,8 V mínimo y 7V máximo. Por este motivo se ha elegido el LM7806 que el regulador de tensión que nos proporciona una tensión más cercana al valor de 6,5V.

Podemos observar el circuito diseñado en la figura 7.3.

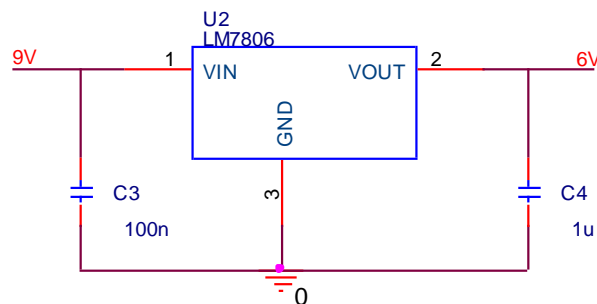


Figura 7.3. Fuente de alimentación LM7806

## 8. CREACIÓN DE LOS CIRCUITOS IMPRESOS (PBAs)

La implementación física del diseño hemos utilizado el programa de diseño asistido Orcad, en su versión 9.2 [7].

Este programa se separa en dos sub-programas diferentes. Por un lado tenemos el Orcad Capture con el que implementaremos los esquemáticos del diseño y por otro lado el Orcad Layout [7] [8] donde diseñaremos las PBAs para su posterior impresión en fotolito.

La implementación en el Orcad Capture es el primer paso que debemos llevar a cabo. En este programa instaremos los diferentes componentes y conexiones eléctricas entre ellos.





Una de las ventajas que tiene utilizar este tipo de programas de diseño es que nos dan los posibles fallos que se puedan tener en las conexiones, aparte de poder realizar pruebas.

Aunque en un principio el esquemático llevará instaladas sus correspondientes alimentaciones, para el posterior uso del esquemático y su implementación en el layout es necesario instalar jumpers en todas las entradas y salidas de los diferentes sub-circuitos.

Se ha decidido instalar todos los interruptores fuera de las placas principales e instalarlas en la caja de montaje que protegerá dichas placas.

Se pueden ver los circuitos implementados en Orcad Capture en el anexo 12.2.

Para pasar los esquemáticos a un Layout se deberá crear la netlist en el Orcad Capture y posteriormente cargar este archivo en el Orcad Layout [7].

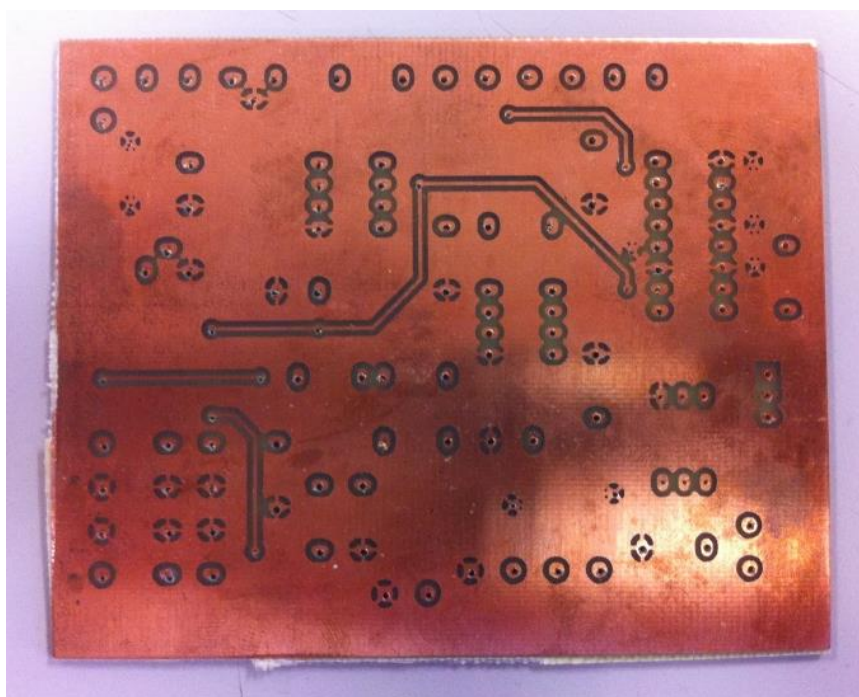
Para el diseño del fotolito con el que se imprimirá la placa necesitamos saber las características de nuestros componentes: tamaño, posición de sus pines y huella. Para ello se definirá en Layout uno a uno las diferentes características de diseño del componente que nos da el fabricante en sus hojas de características.

Una vez definidos todos estos componentes se colocarán los componentes bajo un tamaño elegido de placa de manera que no suframos ningún tipo de calentamiento posterior en los componentes o alguna conexión cruzada en el diseño físico.

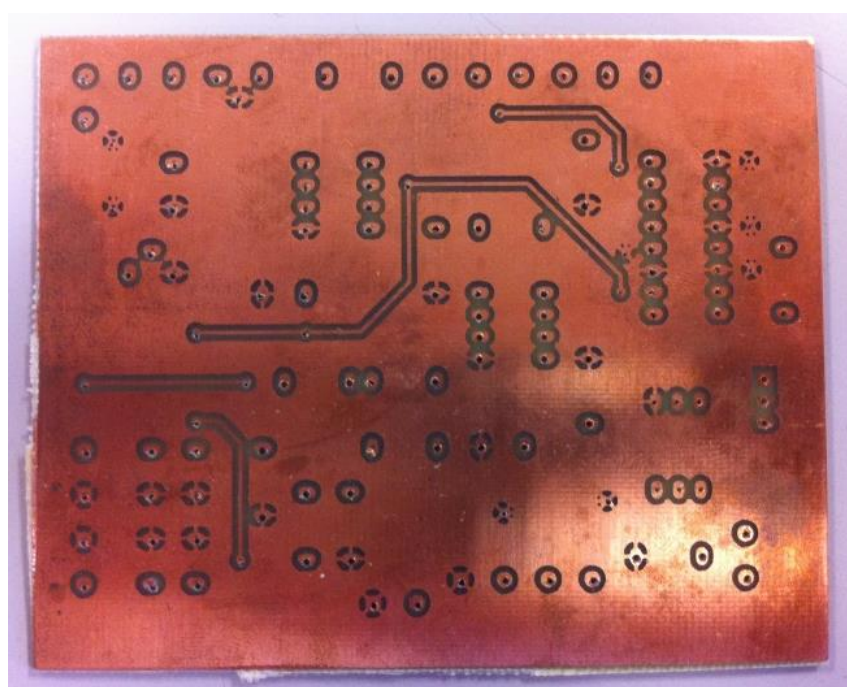
En el anexo 12.2 se pueden observar los diferentes layouts del emisor y receptor.

Se han diseñado las PBAs con un plano de tierra en las capas TOP y BOTTOM. A parte tendremos varios puntos de conexión entre estas capas para evitar que se crucen las vías del diseño.

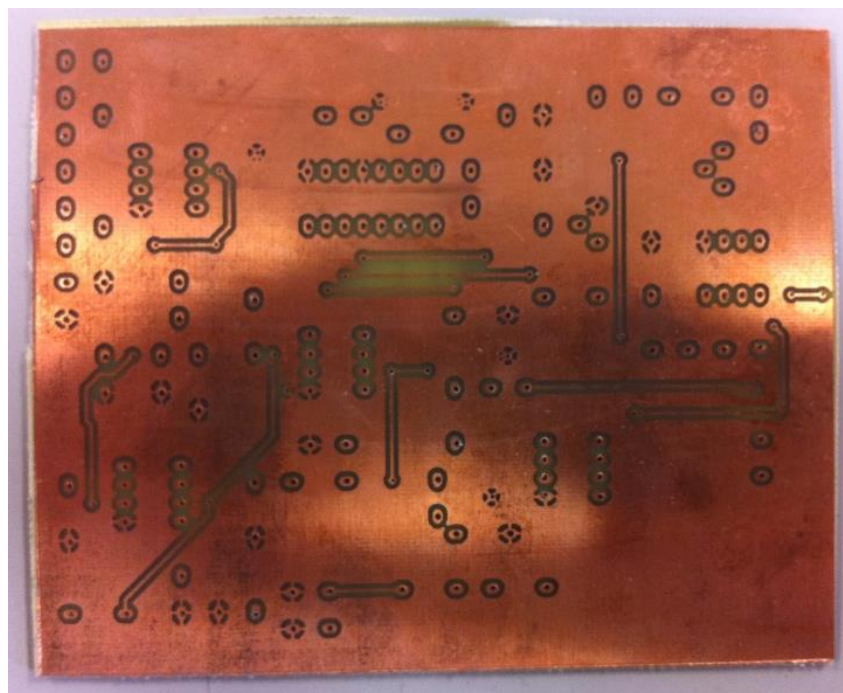
En las figuras 8.1, 8.2, 8.3 y 8.4 se puede observar el acabado final de las placas.



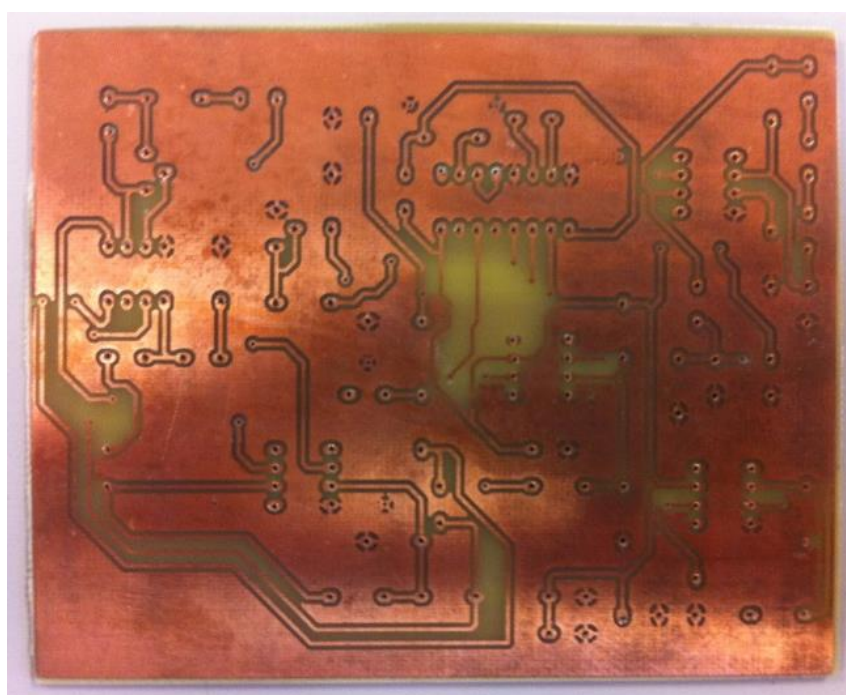
**Figura 8.1. Placa Emisor, Capa TOP.**



**Figura 8.2. Placa Emisor, Capa BOTTOM.**



**Figura 8.3. Placa Receptor, Capa TOP.**



**Figura 8.4. Placa Receptor, Capa BOTTOM.**



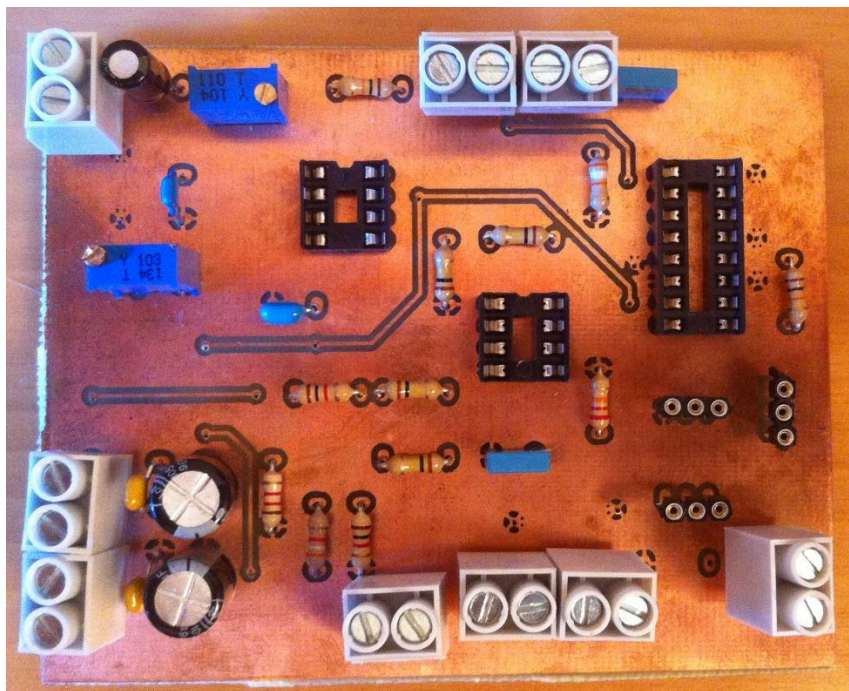
## 9. MONTAJE

El montaje de los componentes en la placa se ha realizado en dos pasos: taladrado y soldadura.

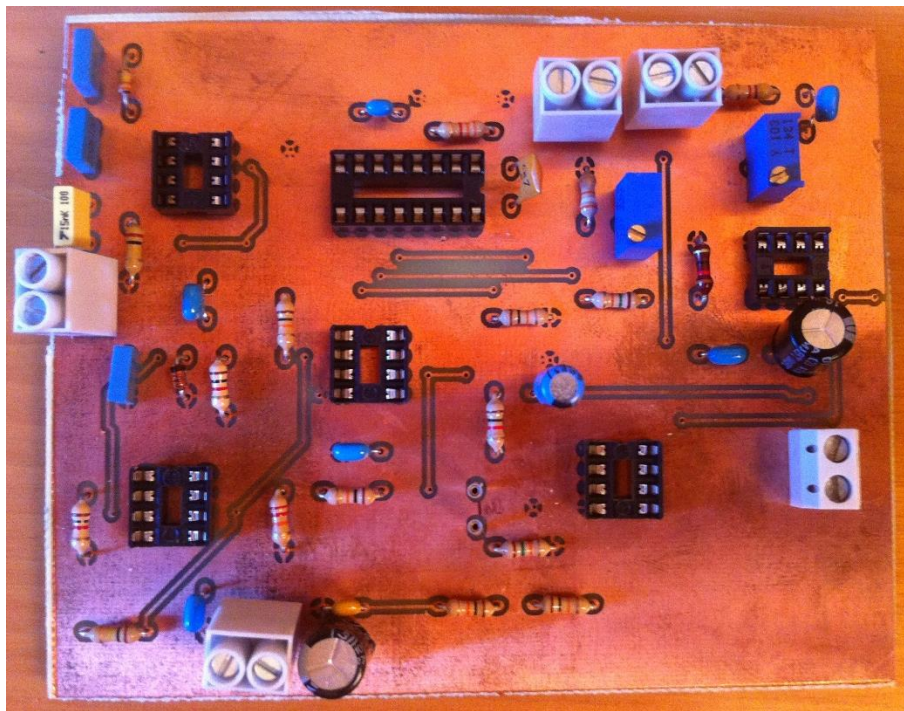
El taladro de las huellas para la colocación de los componentes se ha realizado con una broca de 0,7mm. El taladro para las vías que unen la capa top con la bottom se ha realizado con una broca de 0,4mm.

El soldado de los diferentes componentes se ha realizado manualmente con estaño de soldadura de 1mm de grosor.

En las figuras 9.1 y 9.2 se puede observar el acabado final de emisor y receptor.



**Figura 9.1. Montaje circuito Emisor**



**Figura 9.2. Montaje circuito receptor**

Los circuitos montados en las figuras 9.1 y 9.2 son una prueba real de cómo quedaría un montaje completo del proyecto.

El encapsulamiento de los circuitos vendrá determinado por el uso que se le va a dar al proyecto, dependiendo del tamaño, lugar de instalación y posible calor térmico externo al que este expuesto.

Para el montaje final se deberá seguir las directrices de conexión especificadas en las figuras 9.3 y 9.4.

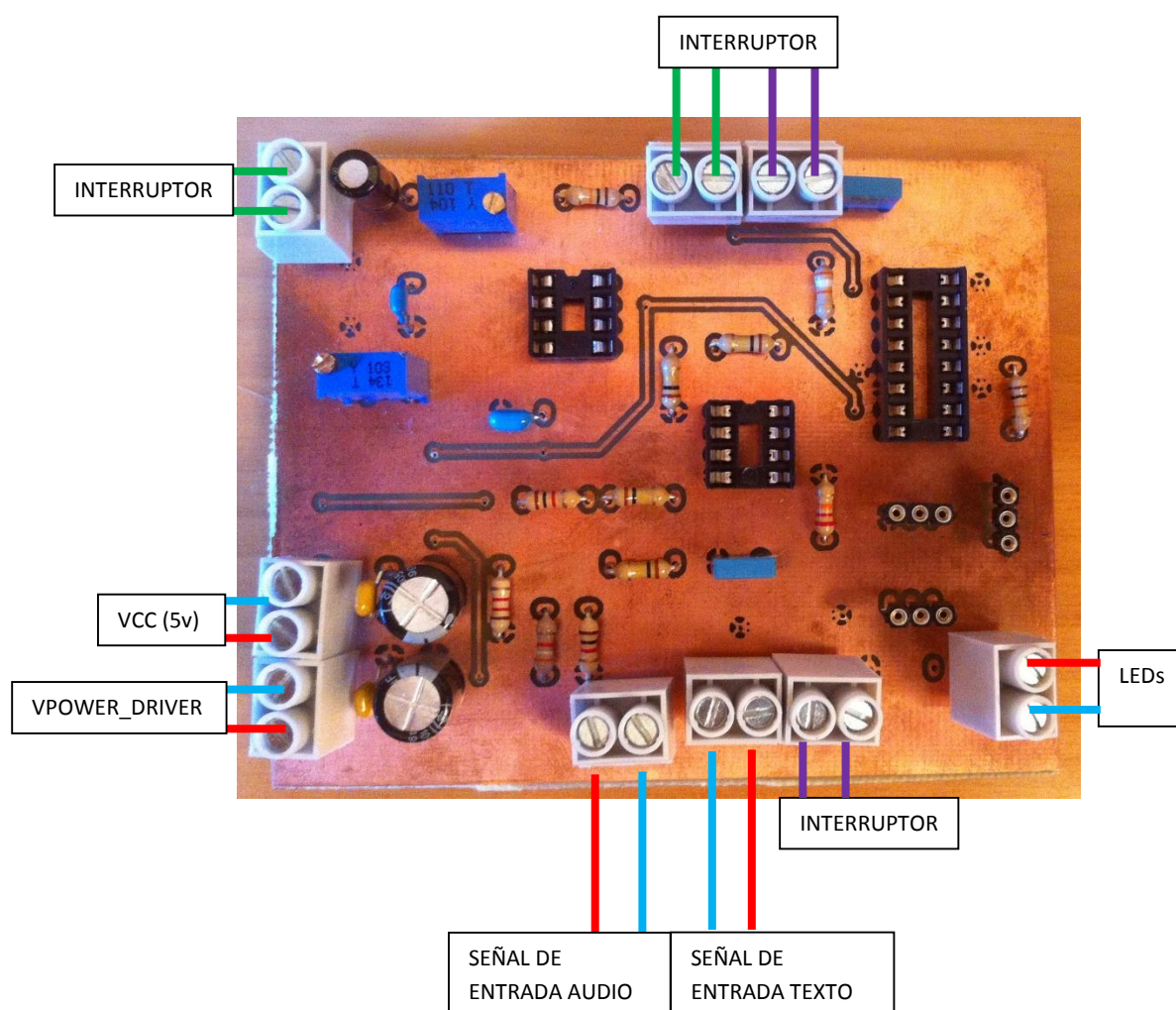
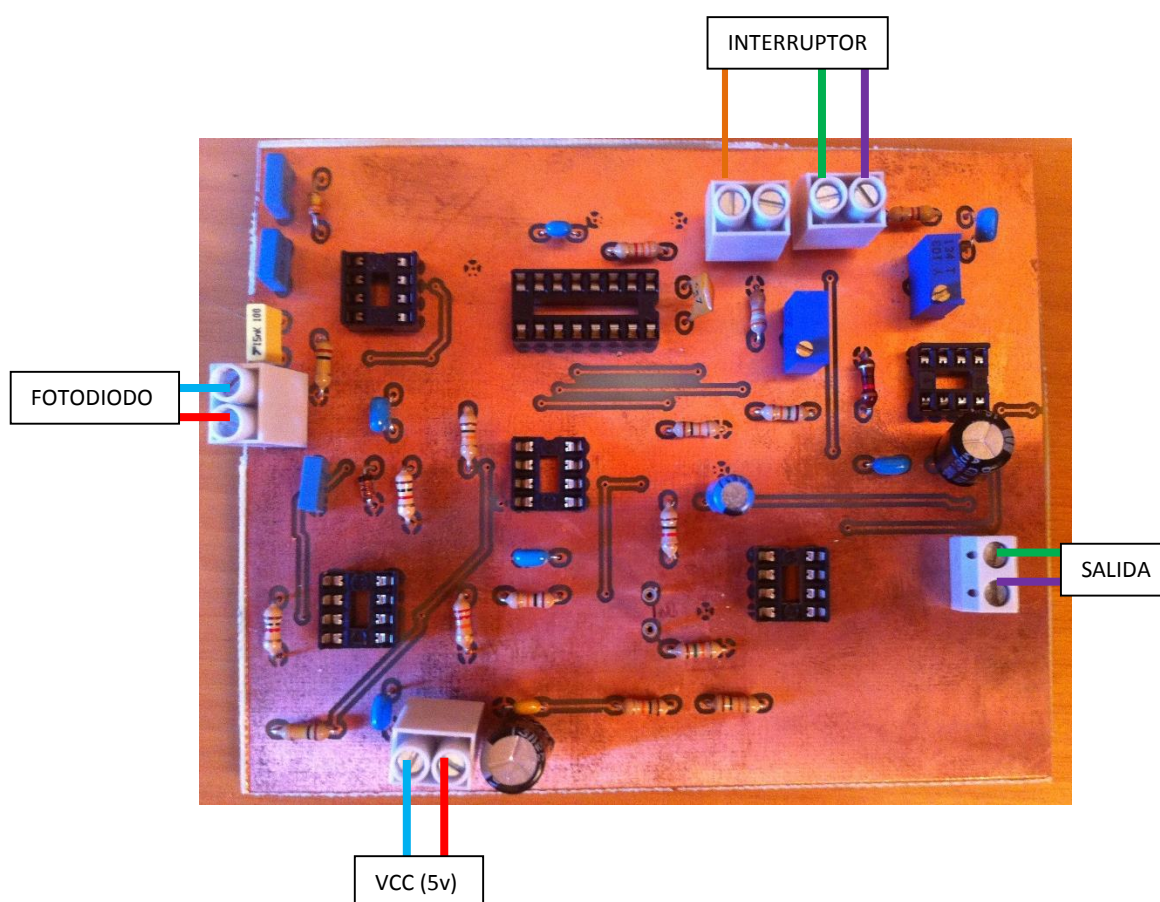


Figura 9.3. Conexiones con componentes externos - Emisor





**Figura 9.4. Conexiones con componentes externos - Receptor**

## 10. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

### 10.1. CONCLUSIONES FINALES.

El diseño final implementado físicamente ha dado un correcto funcionamiento respecto a las especificaciones concretadas en este documento.

Se ha conseguido un sistema físico de emisión de datos a través de luz LED. El sistema inicial tenía problemas de calentamiento y de transmisión en de los datos.

Se ha conseguido reducir el calentamiento de la placa emisora, especialmente la etapa de potencia o driver. Esta etapa en su fase inicial de diseño tenía un sobrecalentamiento durante la conmutación continua de los LEDs. Sin una carga resistiva se ha diseñado para que sea capaz de dar a los LEDs la corriente que piden al circuito.

Se ha conseguido que las señales de emisión y recepción sean tratadas convenientemente, evitando las imperfecciones en sus distintas etapas, a fin de obtener una señal limpia.

Se ha conseguido aumentar la distancia entre LEDs y fotodiodo, de manera que la señal no sature y el que no haya distorsiones en la captación de la potencia luminosa.

Como conclusión final, se ha diseñado un sistema de bajo coste para el uso de cualquier usuario pudiendo realizarse el envío de datos de audio o texto a través de luz LED que puede ser usada simultáneamente para propuestas de iluminación.

### 10.2. TRABAJOS FUTUROS.

Con las conclusiones obtenidas en este trabajo, se puede seguir mejorando la tecnología implementada para el sistema. En concreto:

- Mejorar las prestaciones de algunos componentes (p.e. Amplificadores operacionales) de mayor velocidad de respuesta.





- Mejorar el filtrado óptico del receptor con filtros ópticos sintonizados a la longitud de onda que queramos (evitar luz ambiente, etc.).
- Hacer uso de otras posibilidades como por ejemplo la triangulación de señales para posicionamiento en interiores.

Por otro lado se podría aumentar la distancia, aún más, de la conexión LED-Fotodiodo, para un uso de mayor alcance.

El diseño podría ser reducido a menor tamaño o implementado en microtecnología, de modo que el usuario pueda transportar el dispositivo con facilidad.

La idea y como trabajo futuro más importante es la instalación de este dispositivo en el día a día de los usuarios.

Puede ser usado para la comunicación a los usuarios en edificios privados y públicos a través de la línea de luminarias, sustitución de otras maneras de comunicación como los dispositivos NFC, Bluetooth, o para un uso más doméstico.



## 11. REFERENCIAS

- **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**Ref.: Título. Autor. Editorial. Año edición**

[1] Circuitos y dispositivos electrónicos, Fundamentos de electrónica. Lluís Prat Viñas, ed. Ediciones UPC. 1998.

[2] Problemas de Electrónica de Potencia. Andrés Barrado y Antonio Lázaro. Pearson Prentice Hall. 2007.

[3] Electrónica. Allan R. Hambley. Pearson Prentice Hall. 2001

[4] Optoelectrónica y comunicación óptica. José María Albella Martín; José M. Martínez-Duart, Juan José Jimenéz Lidón. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. 1988.

- **REFERENCIAS VIA-WEB**

**Ref.: Página Web, fecha:**

[5] <http://www.learningaboutelectronics.com/Articles/How-to-connect-a-voltage-regulator-in-a-circuit>

Última visita 2015 05 15

[6] <https://infolds.wordpress.com/caracteristicas-fisicas-de-los-leds/>

Última visita 2015 02 23



[7] [http://materias.fi.uba.ar/6625/TPs/Tutoriales/9\\_1Tutorial%20SPICE.pdf](http://materias.fi.uba.ar/6625/TPs/Tutoriales/9_1Tutorial%20SPICE.pdf)

Última visita 2015 04 01

[8] <https://filebox.ece.vt.edu/~LiaB/EDPS%202/pcblabedp2.pdf>

Última visita 2015 04 02

[9]

[http://cvb.ehu.es/open\\_course\\_ware/castellano/tecnicas/electro\\_gen/teoria/tema-4-teoria.pdf](http://cvb.ehu.es/open_course_ware/castellano/tecnicas/electro_gen/teoria/tema-4-teoria.pdf)

Última visita 2015 02 29

[10] <http://www.alromar-energia.es/blog/ventajas-y-desventajas-de-la-tecnologia-led/>

Última visita 2015 03 10

[11]

[http://www.windows2universe.org/physical\\_science/magnetism/em\\_visible\\_light.html&lang=sp](http://www.windows2universe.org/physical_science/magnetism/em_visible_light.html&lang=sp)

Última visita 2015 03 10

[12] <https://www.sparkfun.com/products/retired/11343>

Última visita 2015 04 06

[13] <http://www.neoteo.com/electronica-basica-amplificador-de-audio/>

Última visita 2015 01 01

[14] <http://tienda.bricogeek.com/descatalogado/396-ioio-otg-para-android.html>

Última visita 2015 05 19



## 12. ANEXOS.

### 12.1. PRESUPUESTO

#### Costes Materiales

Código	Unidad	Descripción	Cantidad	Precio	Precio total
01		<b>CAPÍTULO 1: Emisor</b>			
01.01	UD	Resistencia 1KΩ 1/4W 5%	3	0,02 €	0,06 €
01.02	UD	Resistencia 10KΩ 1/4W 5%	1	0,02 €	0,02 €
01.03	UD	Resistencia 100KΩ 1/4W 5%	4	0,02 €	0,08 €
01.04	UD	Resistencia 3,9KΩ 1/4W 5%	1	0,02 €	0,02 €
01.05	UD	Resistencia 39KΩ 1/4W 5%	1	0,02 €	0,02 €
01.06	UD	Resistencia 11KΩ 1/4W 5%	1	0,02 €	0,02 €
01.07	UD	Resistencia 1,2KΩ 1/4W 5%	1	0,02 €	0,02 €
01.08	UD	Resistencia 100Ω 1/4W 5%	1	0,02 €	0,02 €
01.09	UD	Resistencia 330kΩ 1/4W 5%	1	0,02 €	0,02 €
01.10	UD	Potenciómetro ajustable 25vueltas 10K	1	0,52 €	0,52 €
01.11	UD	Potenciómetro ajustable 25vueltas 100K	1	0,54 €	0,54 €
01.12	UD	Condensador Cerámico 102, 1nF	1	0,07 €	0,07 €
01.13	UD	Condensador Cerámico 223, 22nF	2	0,08 €	0,16 €
01.14	UD	Condensador Cerámico 103, 10nF	1	0,07 €	0,07 €
01.15	UD	Condensador Electrolítico 1μF 63V	1	1,76 €	1,76 €
01.16	UD	Amplificador Operacional MC34071	1	0,73 €	0,73 €
01.17	UD	Amplificador Operacional MC34072	1	0,76 €	0,76 €
01.18	UD	Transistor NPN BJT BC547B	1	0,50 €	0,50 €
01.19	UD	transistor PNP BJT BC557B	1	0,50 €	0,50 €
01.20	UD	Transistor IRF530 MOSFET N Channel 100volt	1	0,79 €	0,79 €
01.21	UD	LED W11492	3	9,25 €	27,75 €
01.22	UD	NXP 74HCT4046AN 74HCT CMOS, 74HCT4046, DIP16, 5V	1	0,83 €	0,83 €
01.23	UD	Clema circuito impreso 2 vías	9	0,24 €	2,16 €
02		<b>CAPÍTULO 2: RECEPTOR</b>			
02.01	UD	Resistencia 11Ω 1/4W 5%	1	0,02 €	0,02 €
02.02	UD	Resistencia 1KΩ 1/4W 5%	3	0,02 €	0,06 €
02.03	UD	Resistencia 10KΩ 1/4W 5%	4	0,02 €	0,08 €
02.04	UD	Resistencia 3,3KΩ 1/4W 5%	1	0,02 €	0,02 €
02.05	UD	Resistencia 39KΩ 1/4W 5%	1	0,02 €	0,02 €



02.06	UD	Resistencia 11K $\Omega$ 1/4W 5%	1	0,02 €	0,02 €
02.07	UD	Resistencia 4,75K $\Omega$ 1/4W 5%	1	0,02 €	0,02 €
02.08	UD	Resistencia 5K $\Omega$ 1/4W 5%	1	0,02 €	0,02 €
02.09	UD	Resistencia 2,2K $\Omega$ 1/4W 5%	1	0,02 €	0,02 €
02.10	UD	Resistencia 100K $\Omega$ 1/4W 5%	3	0,02 €	0,06 €
02.11	UD	Resistencia 330K $\Omega$ 1/4W 5%	1	0,02 €	0,02 €
02.12	UD	Potenciómetro ajustable 25vueltas 10K	2	0,52 €	1,04 €
02.13	UD	Condensador Cerámico 102, 1nF	5	0,07 €	0,35 €
02.14	UD	Condensador Cerámico 223, 22nF	4	0,08 €	0,32 €
02.15	UD	Condensador Cerámico 103, 10nF	1	0,07 €	0,07 €
02.16	UD	Condensador Cerámico 153, 15nF	1	0,07 €	0,07 €
02.17	UD	Condensador Cerámico 474, 470nF	1	0,65 €	0,65 €
02.18	UD	Condensador Electrolítico 1 $\mu$ F 63V	1	1,76 €	1,76 €
02.19	UD	Condensador Electrolítico 220 $\mu$ F 100V	1	0,40 €	0,40 €
02.20	UD	Amplificador Operacional MC34071	3	0,73 €	2,19 €
02.21	UD	LM386 Low Voltage Audio Power Amplifier	1	0,79 €	0,79 €
02.22	UD	NXP 74HCT4046AN 74HCT CMOS, 74HCT4046, DIP16, 5V	1	0,83 €	0,83 €
02.23	UD	BPMW34 Silicone PIN Photodiode	1	1,38 €	1,38 €
02.24	UD	Clema circuito impreso 2 vías	5	0,24 €	1,20 €
03	CAPÍTULO 3: ALIMENTACIÓN				
03.01	UD	Regulador LM7805	1	0,02 €	0,02 €
03.02	UD	Regulador LM7806	3	0,02 €	0,06 €
03.03	UD	Condensador Electrolítico 0,1 $\mu$ F 63V	5	0,07 €	0,35 €
03.04	UD	Condensador Electrolítico 0,33 $\mu$ F 63V	4	0,08 €	0,32 €
03.05	UD	Condensador Electrolítico 1 $\mu$ F 63V	1	0,07 €	0,07 €
03.06	UD	Condensador Cerámico 104, 100nF	1	0,07 €	0,07 €
03.07	UD	Clema circuito impreso 2 vías	4	0,24 €	0,96 €
04	CAPÍTULO 3: PBAs				
04.01	UD	Rollo de Estaño de soldadura 5mm	1	6,00 €	6,00 €
04.02	UD	Broca 0,7mm	3	1,03 €	3,09 €
04.03	UD	Broca 0,4mm	3	1,20 €	3,60 €
04.04	UD	Fotolito Impreso	2	0,00 €	0,00 €
04.05	m	Cable rígido	2	1,28 €	2,56 €
05	CAPÍTULO 4: Herramientas y Aparatos de Medida				
05.01	UD	Trimmer	1	0,50 €	0,50 €
05.02	UD	Cortacables	1	7,58 €	7,58 €
05.03	UD	Voltímetro AMPROBE 37XR-A	1	173,40 €	173,40 €
05.04	UD	Osciloscopio SIGLENT SDS 1064CFL	1	336,00 €	336,00 €
05.05	UD	Fuente de alimentación	2	422,92	845,84 €

05.06	UD	Generador de señales	1	435,00 €	435,00 €
05.07	UD	Soldador	1	5,42 €	5,42 €
TOTAL					1.869,67 €

**Figura 12.1. Coste de materiales**

### Costes de personal

Ocupación	Horas	Precio / Hora	Importe
Ingeniero	693	23	15.939,00 €
Jefe de proyecto	84	39	3.276,00 €
TOTAL			19.215,00 €

**Figura 12.2. Coste de personal**

### Costes totales

Concepto	PRECIO (€)
Coste de Material	1.869,67 €
Coste de Personal	19.215,00 €
Costes indirectos y gastos generales (15%)	3.162,70 €
<i>Subtotal</i>	24.247,37 €
IVA (21%)	5.091,95 €
TOTAL	29.339,32 €

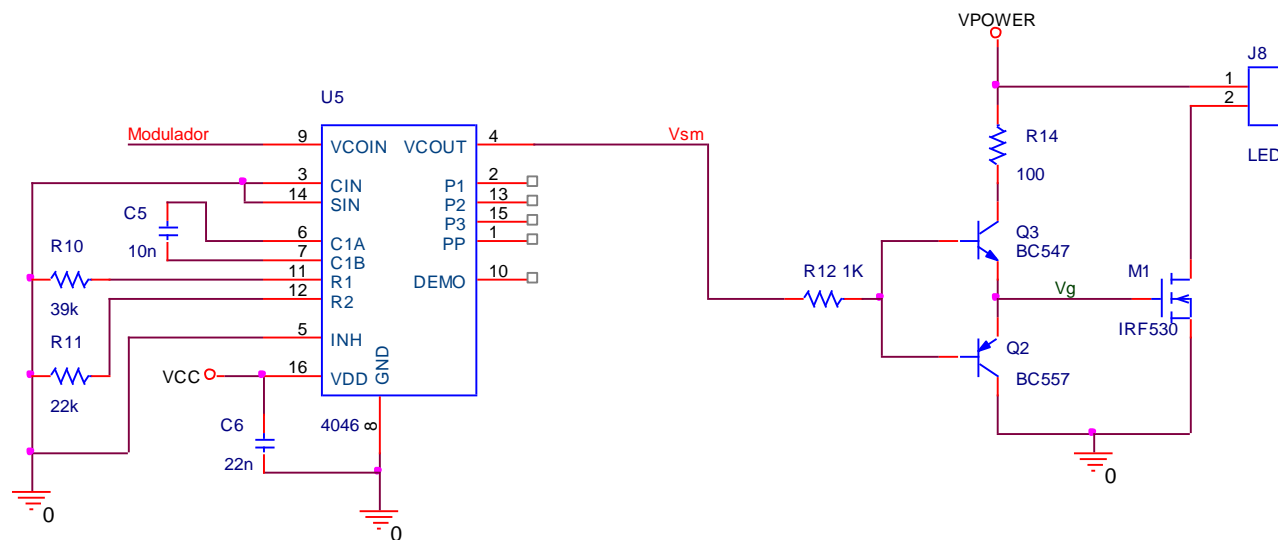
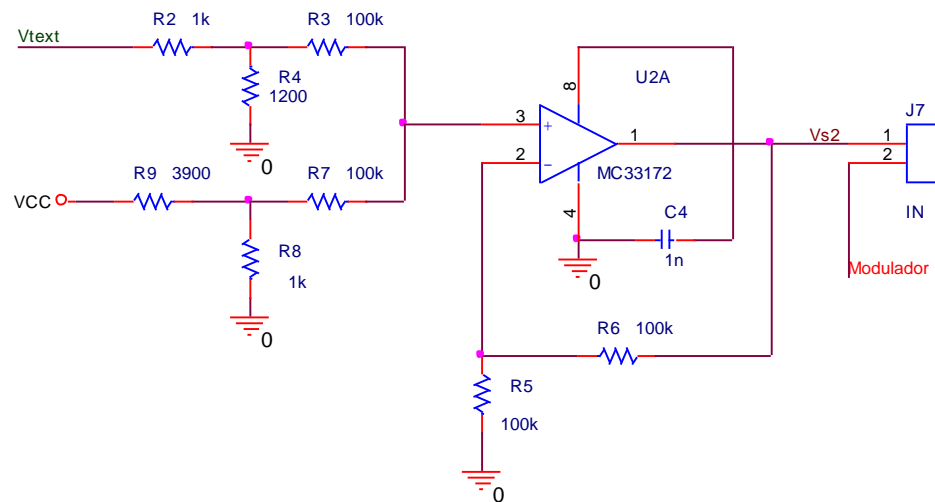
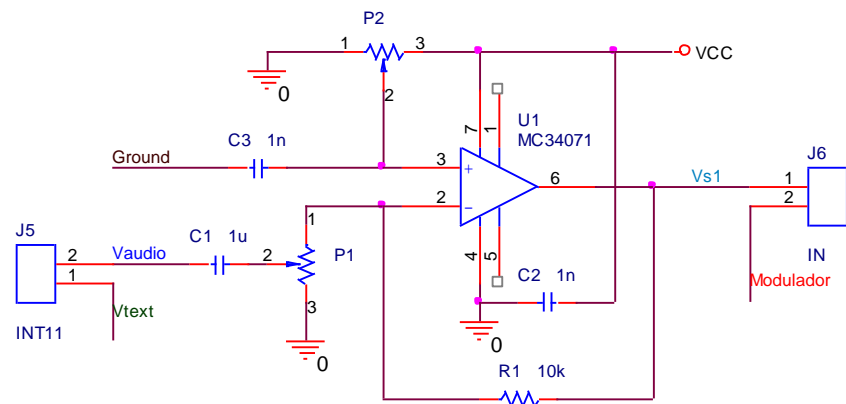
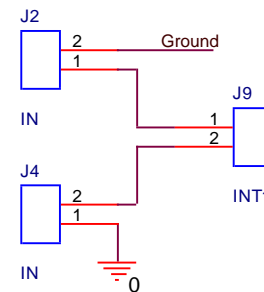
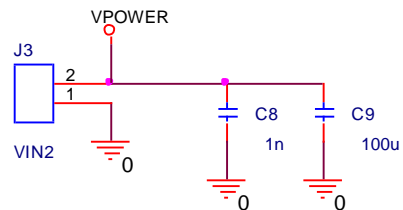
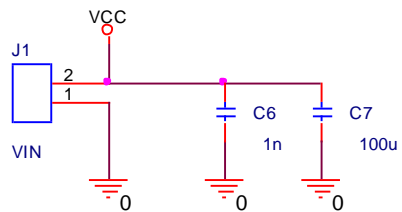
**Figura 12.3. Coste Total**

El coste total del proyecto es de veintinueve mil trescientos treinta y nueve euros con treinta y dos céntimos.



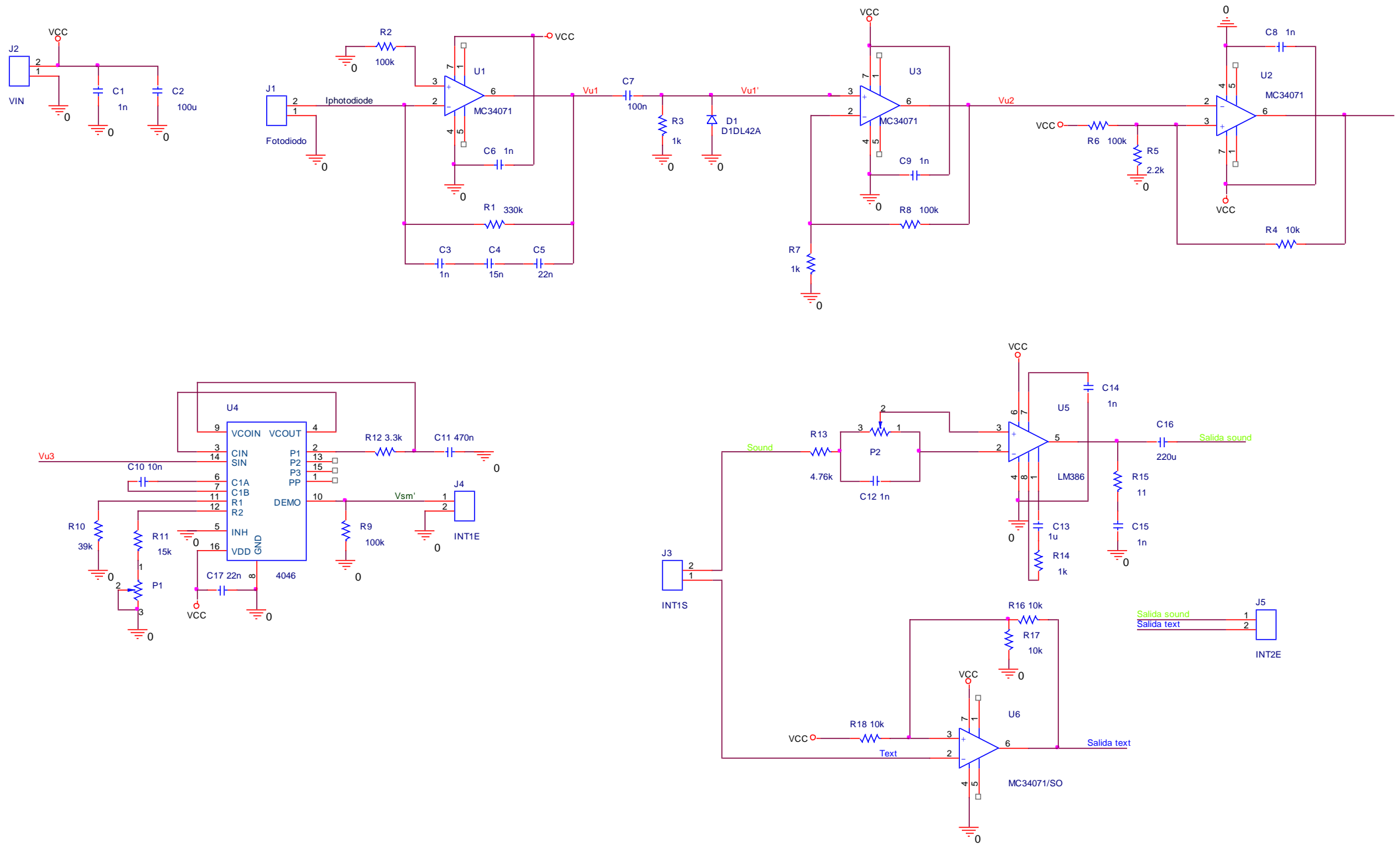
## 12.2. ESQUEMÁTICOS DEL CIRCUITO

En este apartado se pueden observar los esquemáticos de las distintas partes del proyecto.

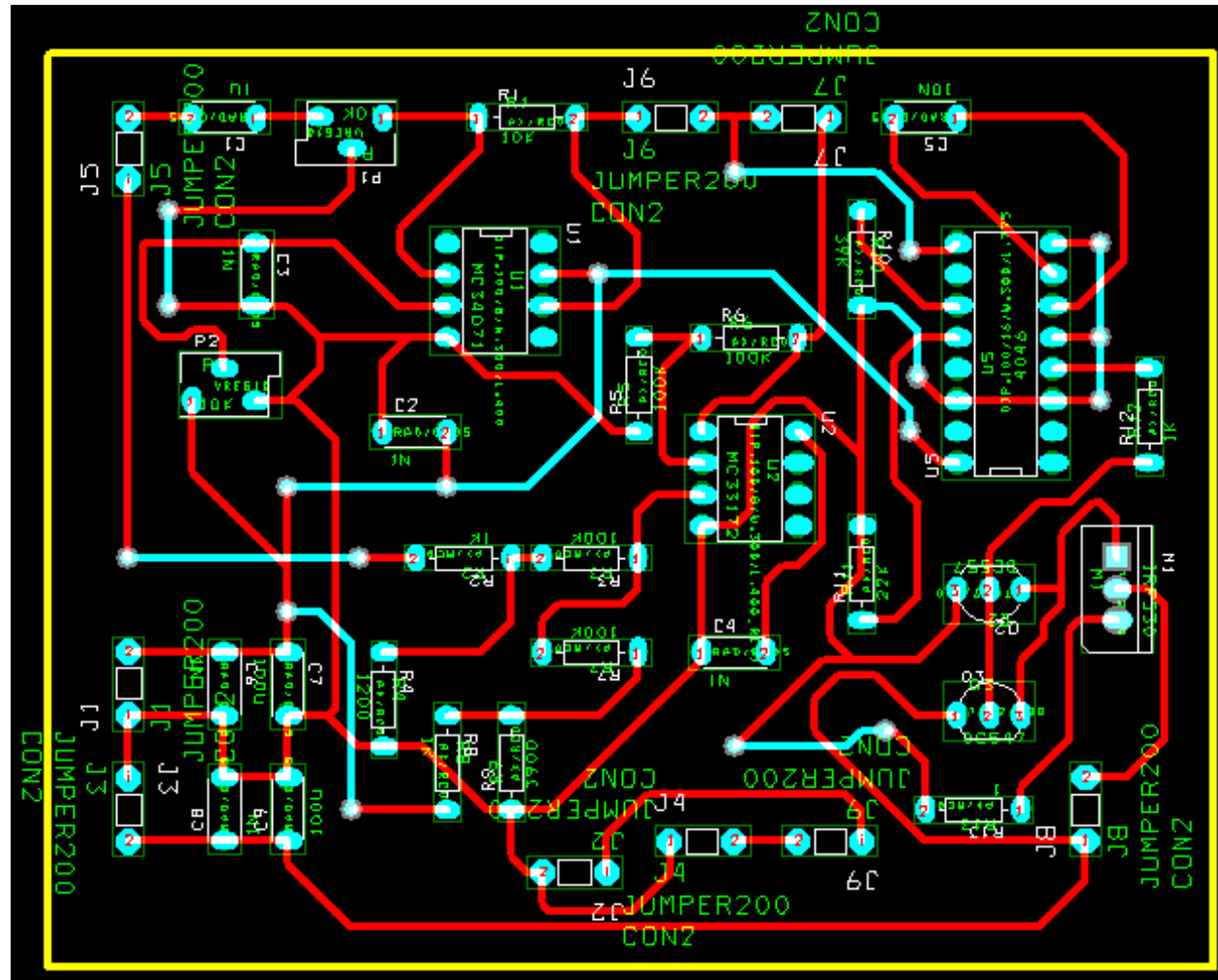


Title		
Circuito Receptor		
Size	Document Number	Rev
B	2	2015.04.10
Date: Saturday, May 23, 2015 Sheet 1 of 1		

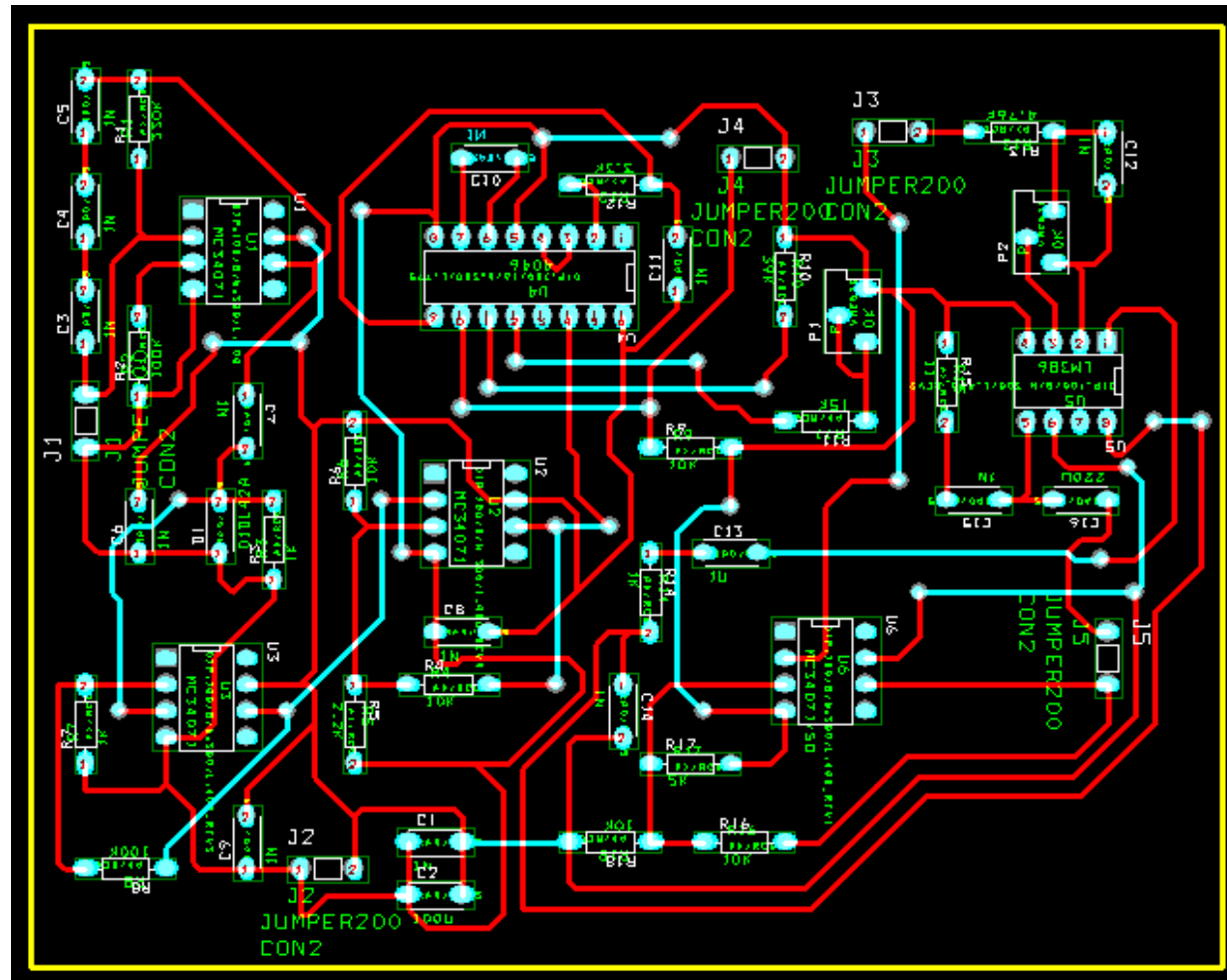




Title		
Circuito Receptor		
Size	Document Number	Rev
B	2	2015.04.10
Date:	Saturday, May 23, 2015	Sheet 1 of 1

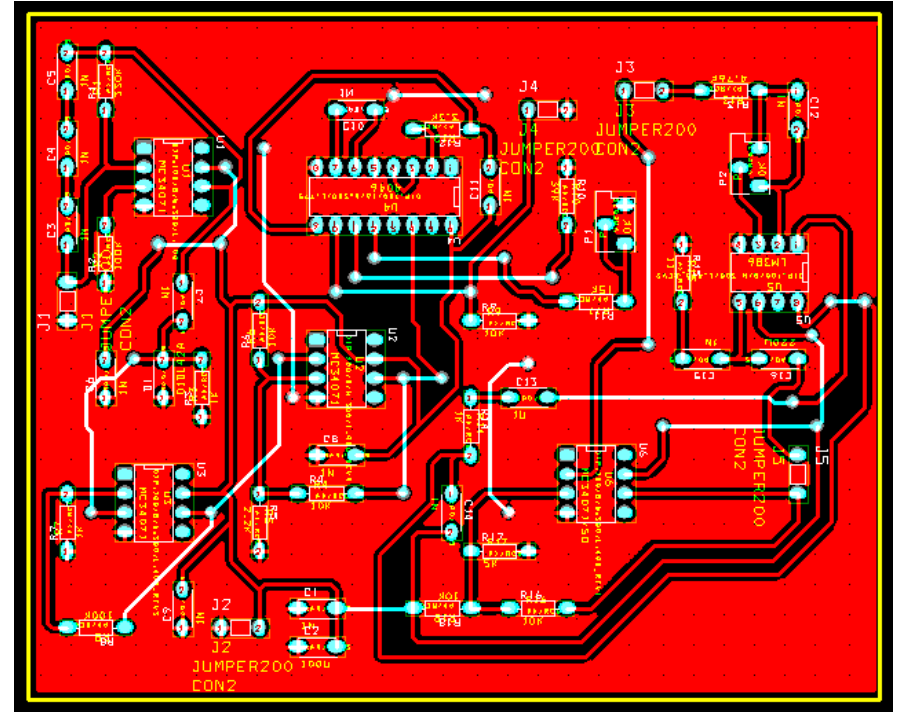
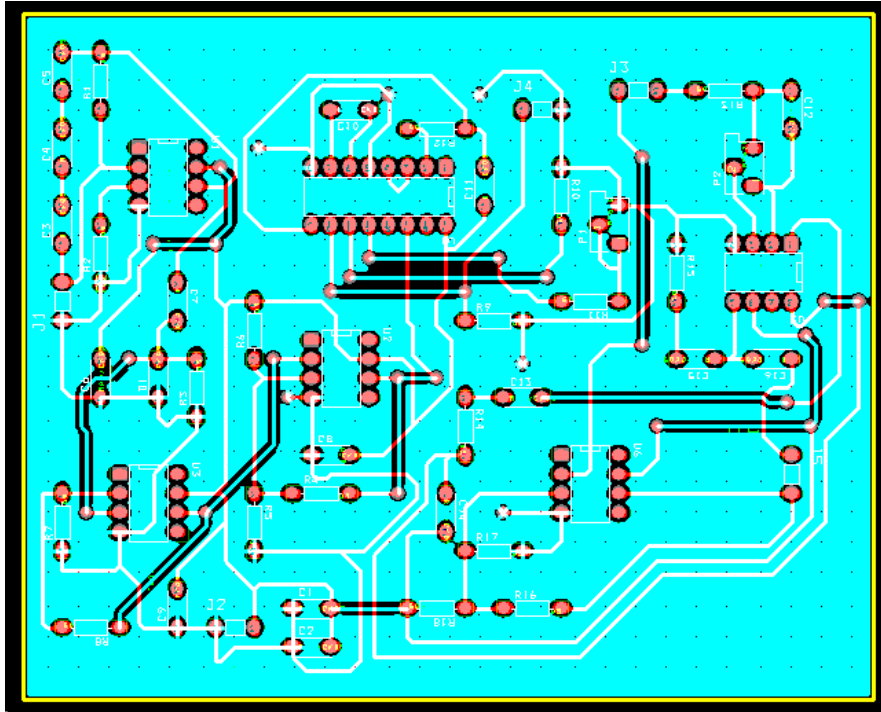


Title		
Layout Emisor sin tierra		
Size	Document Number	Rev
Custom	3	2015.04.10
Date:	Sunday, May 31, 2015	Sheet 1 of 1



Title		
Lay out Receptor sin tierra		
Size	Document Number	Rev
Custom	4	2015.04.10
Date:	Sunday, May 31, 2015	Sheet 1 of 1





Title			
Top y Bottom, Receptor			
Size	Document Number	Rev	
Custom	5	2015.04.10	
Date:	Sunday, May 31, 2015	Sheet	1 of 1

### **12.3. HOJAS DE CARACTERÍSTICAS.**

En este apartado se pueden observar las hojas de características de los aparatos usados en el proyecto.